LOGICIEL TALREN 4
V 1.3 et versions ultérieures

Addendum : méthode du calcul à la rupture

1 INTRODUCTION

Le logiciel TALREN 4, à partir de sa version v1.3, propose aux utilisateurs outre les 3 méthodes de calcul de Fellenius, Bishop et des perturbations, la méthode du calcul à la rupture, associée aux spirales logarithmiques.

Un exemple de calcul effectué avec la méthode du calcul à la rupture est donné sur la figure ci-dessous.

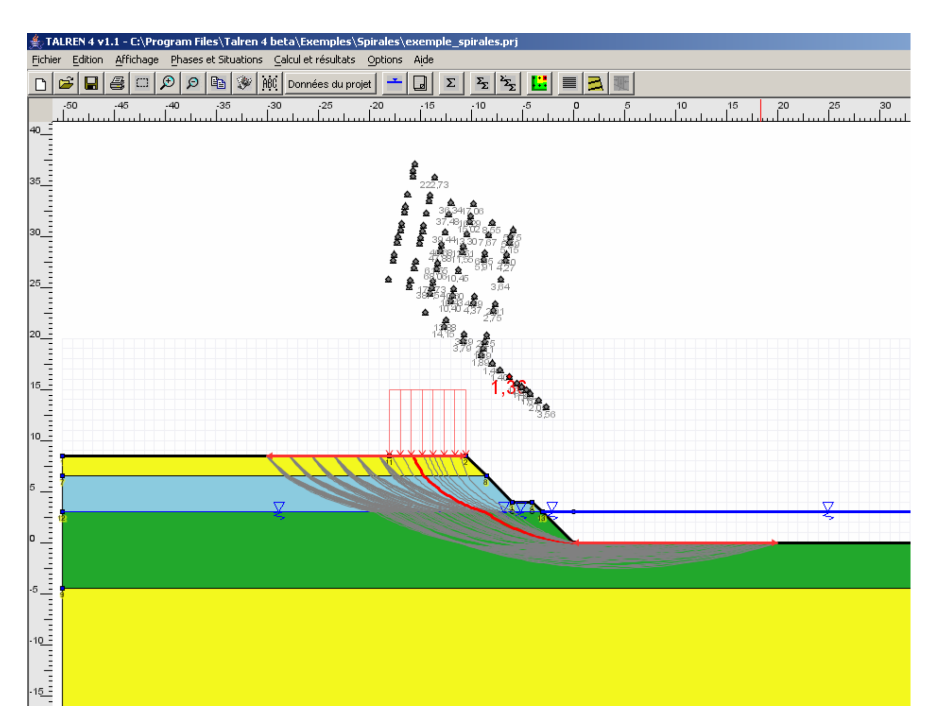


Figure 1 : exemple de résultat de recherche automatique pour les spirales logarithmiques dans Talren 4 (avec affichage de toutes les spirales calculées)

Ce document constitue un complément à la notice de Talren 4, qui précise toutes les spécificités du logiciel relatives à l'utilisation de la méthode du calcul à la rupture.

2 ADDITIF AU MANUEL D'UTILISATION (CHAPITRE B)

Ce chapitre a pour but de compléter le chapitre B du manuel Talren 4 avec les aspects spécifiques liés à l'utilisation de la méthode du calcul à la rupture dans Talren 4.

Pour les paragraphes existants, on ne précise ici que les ajouts et modifications par rapport au manuel complet (on ne reprend pas l'intégralité des paragraphes existants).

2.1 Divers aspects liés à l'application de la méthode du calcul à la rupture

2.1.1 Rappel important concernant le sens de définition de la coupe

La coupe doit toujours être définie telle que les champs de déplacement soient globalement dirigés de la gauche vers la droite (exemple de la Figure 2), parce que le calcul n'est correct que si les glissements ont tendance à se produire "vers la droite". Cette règle générale s'applique également au calcul à la rupture et particulièrement pour les situations examinant un équilibre de butée qui devront donc également correspondre à des champs de déplacement globalement dirigés de la gauche vers la droite : sur la Figure 3, le champ de déplacement global considéré est bien dirigé de la gauche vers la droite, que l'on étudie la poussée ou la butée (voir également le tutorial 6, chapitre 4.2 de ce document).

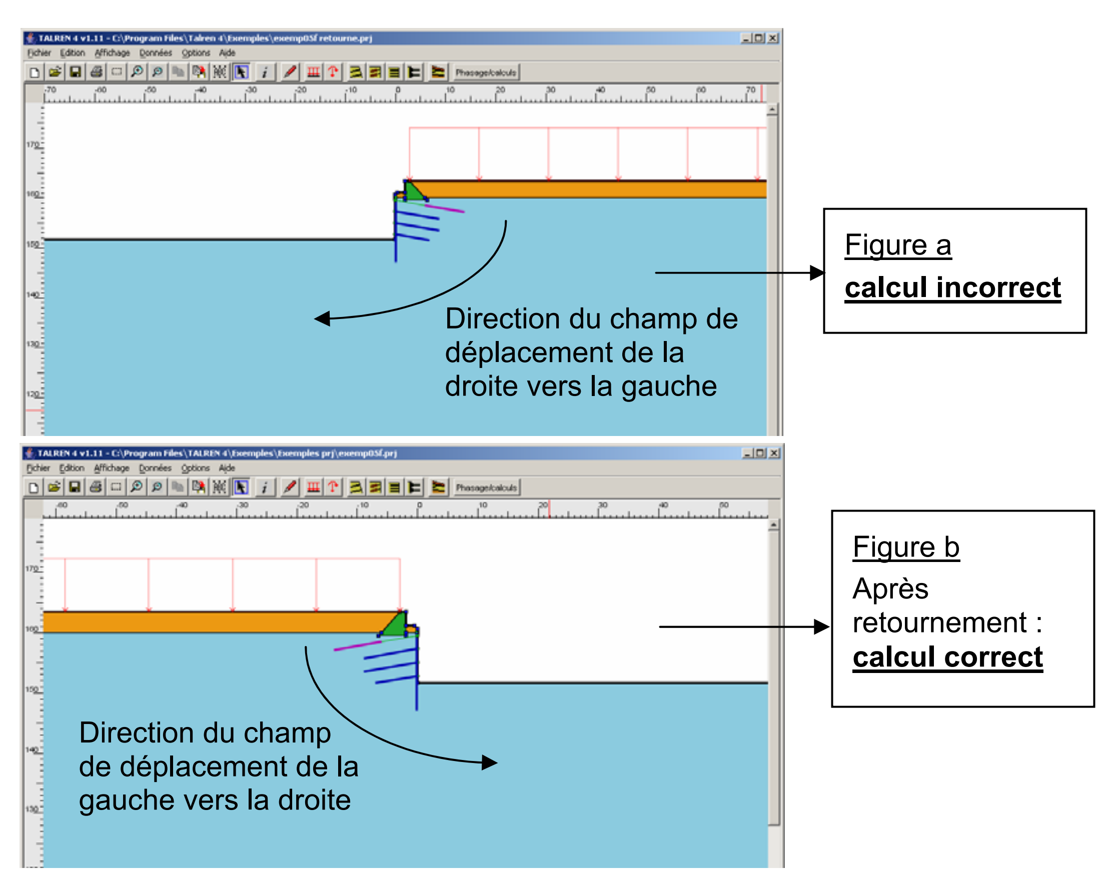


Figure 2 : exemple de retournement de coupe

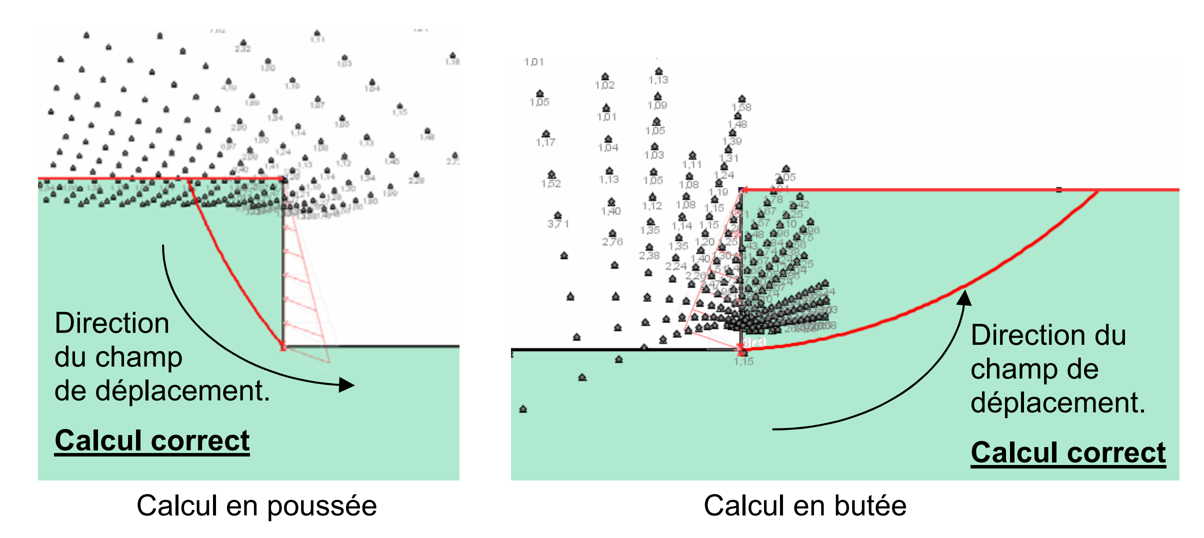


Figure 3 : direction des champs de déplacement dans le cas du calcul à la rupture

2.1.2 Description générale du projet

Quatre méthodes de calcul sont disponibles : Fellenius, Bishop, Perturbations et Calcul à la rupture.

IMPORTANT : le choix de la méthode de calcul peut conditionner l'affichage de certaines données. Par exemple, l'inclinaison non verticale des surcharges réparties n'est possible que si la méthode de calcul à la rupture a été sélectionnée dans la description générale du projet comme méthode de calcul par défaut.

Des contrôles supplémentaires sont effectués au moment du calcul. Par exemple, si la méthode de calcul à la rupture a été choisie comme méthode de calcul par défaut pour le projet, des surcharges réparties inclinées peuvent effectivement être définies en mode données. En mode phasage, pour les phases où ces surcharges sont actives, le calcul ne sera possible que si la méthode de calcul de la situation est bien également le calcul à la rupture. Un calcul avec la méthode de Bishop, par exemple, ne sera pas possible avec des surcharges réparties inclinées, et un message d'erreur s'affichera dans ce cas.

2.1.3 Définition des surcharges

2.1.3.1 Surcharges réparties

Par défaut, les surcharges réparties sont verticales orientées vers le bas (inclinaison de 90°). Il n'est possible de modifier leur inclinaison que dans le cas des calculs par la méthode du calcul à la rupture (spirales logarithmiques), c'est-à-dire si cette méthode de calcul est choisie comme méthode de calcul par défaut pour le projet.

Dans le cas de surcharges appliquées sur des verticales strictes (possibles dans le cas de la méthode de calcul à la rupture), l'ordre des 2 points extrémités de la surcharge est important : les points extrémités de la surcharge doivent être définis dans le sens de parcours du talus de la gauche vers la droite, sinon elles ne sont pas prises en compte correctement dans le calcul. Les sens de définition corrects sont indiqués sur la Figure 4.

2.1.3.2 Torseurs

La largeur de la base de diffusion et l'angle de diffusion n'ont pas de signification pour la méthode de calcul à la rupture (spirales logarithmiques).

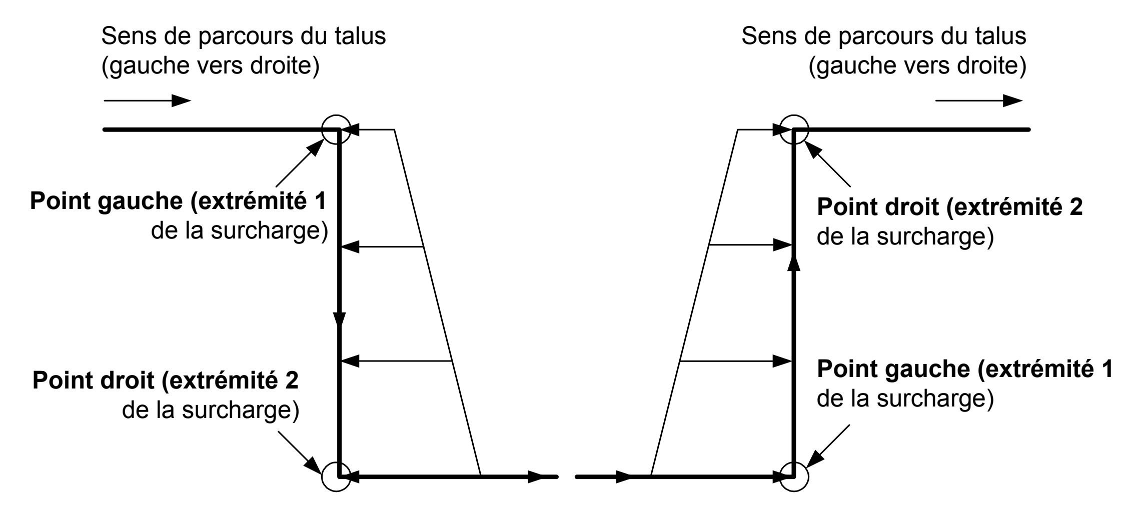


Figure 4 : définition des surcharges réparties appliquées sur des segments verticaux

2.1.4 Définition des renforcements

Quel que soit le type de renforcement considéré (clou, tirant, bande ou buton), la largeur de la base de diffusion et l'angle de diffusion n'ont pas de signification pour la méthode de calcul à la rupture (spirales logarithmiques).

Concernant les clous, dans le cas de calculs avec la méthode du calcul à la rupture, il est recommandé de choisir un angle critique nul.

2.1.5 Définition des paramètres de sol

Il est à noter que les courbes intrinsèques non linéaires ne sont pas compatibles avec l'utilisation de la méthode du calcul à la rupture.

2.2 Définition des paramètres d'un calcul selon la méthode du calcul à la rupture

Il s'agit ici de détailler les données spécifiques à la méthode du calcul à la rupture qui sont à définir à partir de la boîte de dialogue des propriétés d'une situation.

2.2.1 La méthode de calcul

Dans la boîte de dialogue des situations, il est possible de choisir la méthode du calcul à la rupture (que celle-ci ait été choisie ou non comme méthode de calcul par défaut pour le projet dans la définition générale du projet).

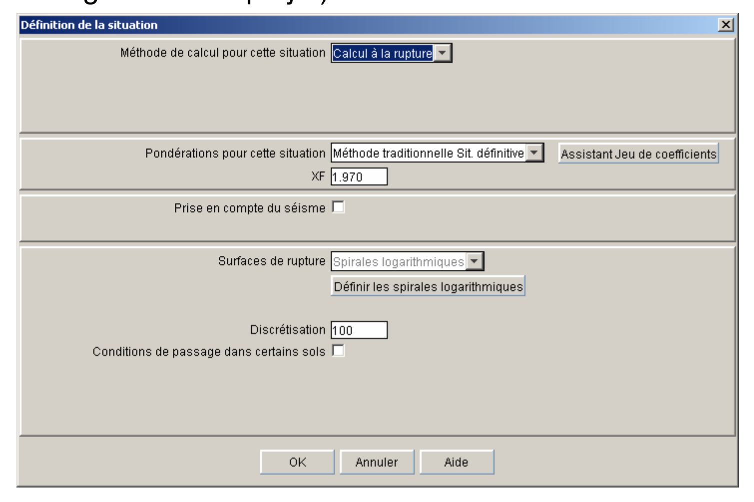


Figure 5 : propriétés d'une situation

2.2.2 Les coefficients partiels de sécurité/pondération

Dans le cas du calcul à la rupture (choix de la méthode de calcul), une ligne supplémentaire est visible : il s'agit du coefficient XF, dont la valeur par défaut est 1,00 (Figure 6). XF est la pondération supplémentaire à introduire simultanément sur tanϕ et sur c pour être en limite de stabilité (F = 1). Voir aussi le chapitre 3.1.3. de ce document.

Cette valeur XF peut être comparée à la valeur du coefficient global calculée par l'une des trois autres méthodes (Fellenius, Bishop ou perturbations), et il est donc intéressant de la rechercher. Cette case permet de le faire rapidement (sans avoir à modifier manuellement les coefficients de sécurité sur c et tanϕ).



Figure 6 : le coefficient XF (méthode du calcul à la rupture)

2.2.3 Les spirales logarithmiques

Si la méthode de calcul sélectionnée pour la situation est "calcul à la rupture", les surfaces de rupture sont automatiquement du type "Spirales logarithmiques" (cf Figure 5) .

Il s'agit de courbes composées d'arcs de spirales logarithmiques de même pôle : ces courbes seront appelées ici pour simplifier "spirales logarithmiques".

L'utilisateur peut cliquer sur le bouton "Définir les spirales logarithmiques". La boîte de dialogue de la Figure 7 apparaît alors.

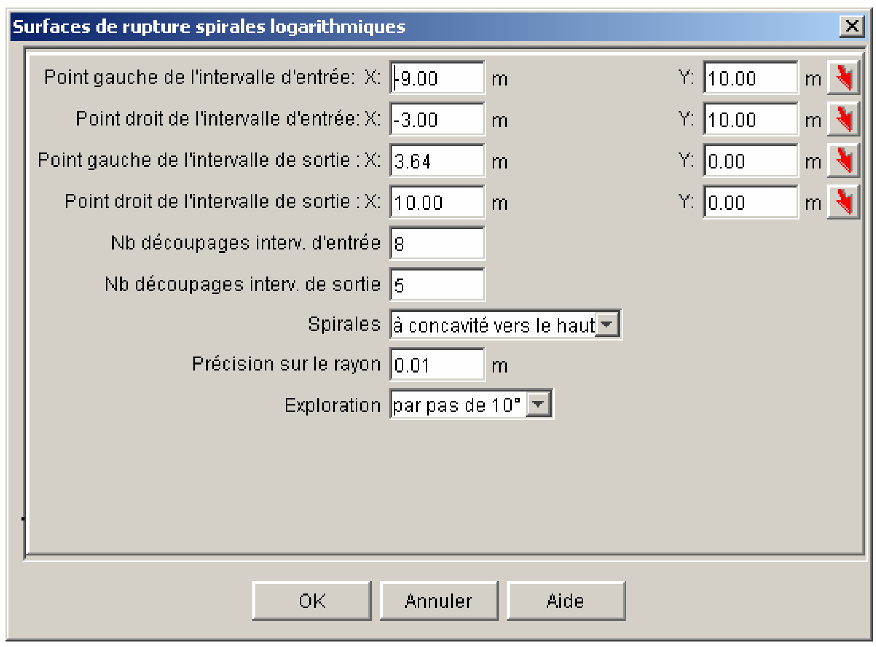


Figure 7 : boîte de dialogue de définition des spirales logarithmiques

Il s'agit de définir les paramètres d'un balayage de courbes composées chacune d'arcs successifs de spirales logarithmiques de même pôle. Pour chaque couple point d'entrée/point de sortie, plusieurs courbes peuvent être calculées (en fonction du type de balayage choisi pour l'angle au centre).

Les données à compléter dans cette boîte de dialogue sont les suivantes (les points gauche et droit de chaque intervalle peuvent être inversés) :

- *Point gauche de l'intervalle d'entrée (X et Y)* : coordonnées (m) du point gauche de l'intervalle définissant la zone d'entrée des spirales logarithmiques dans le sol. Ce

point doit se trouver sur l'enveloppe du talus. Ses coordonnées peuvent être définies :

- Soit par saisie des données X et Y (m) du point dans les cases prévues (la valeur de Y est automatiquement calculée en fonction de celle X de telle sorte que le point se trouve sur l'enveloppe du talus) ;
- Soit par un clic sur le bouton , puis sur le dessin à la position souhaitée pour le point (le point sera automatiquement ramené au point le plus proche sur l'enveloppe du talus).

- *Point droit de l'intervalle d'entrée (X et Y)* : coordonnées (m) du point droit de l'intervalle définissant la zone d'entrée des spirales logarithmiques dans le sol. Ce point doit se trouver sur l'enveloppe du talus. Ses coordonnées peuvent être définies :
  - Soit par saisie des données X et Y (m) du point dans les cases prévues (la valeur de Y est automatiquement calculée en fonction de celle X de telle sorte que le point se trouve sur l'enveloppe du talus) ;
  - Soit par un clic sur le bouton , puis sur le dessin à la position souhaitée pour le point (le point sera automatiquement ramené au point le plus proche sur l'enveloppe du talus).
- *Point gauche de l'intervalle de sortie (X et Y)* : coordonnées (m) du point gauche de l'intervalle définissant la zone de sortie des spirales logarithmiques du sol. Ce point doit se trouver sur l'enveloppe du talus. Ses coordonnées peuvent être définies :
  - Soit par saisie des données X et Y (m) du point dans les cases prévues (la valeur de Y est automatiquement calculée en fonction de celle X de telle sorte que le point se trouve sur l'enveloppe du talus) ;
  - Soit par un clic sur le bouton , puis sur le dessin à la position souhaitée pour le point (le point sera automatiquement ramené au point le plus proche sur l'enveloppe du talus).
- *Point droit de l'intervalle de sortie (X et Y)* : coordonnées (m) du point droit de l'intervalle définissant la zone de sortie des spirales logarithmiques du sol. Ce point doit se trouver sur l'enveloppe du talus. Ses coordonnées peuvent être définies :
  - Soit par saisie des données X et Y (m) du point dans les cases prévues (la valeur de Y est automatiquement calculée en fonction de celle X de telle sorte que le point se trouve sur l'enveloppe du talus) ;
  - Soit par un clic sur le bouton , puis sur le dessin à la position souhaitée pour le point (le point sera automatiquement ramené au point le plus proche sur l'enveloppe du talus).
- *Nombre de découpages de l'intervalle d'entrée* : il s'agit d'un nombre entier, qui définit le nombre de découpages subdivisant la zone d'entrée des spirales dans le sol : si cette valeur vaut 0, seul le point gauche de l'intervalle sera considéré ; si elle vaut 1, les 2 points extrêmes de l'intervalle seront examinés ; si elle vaut 2, un troisième point d'entrée des spirales sera également considéré (au milieu de la zone d'entrée, découpant celle-ci en 2 sous-intervalles), etc.
- *Nombre de découpages de l'intervalle de sortie* : il s'agit d'un nombre entier, qui définit le nombre de découpages subdivisant la zone de sortie des spirales du sol : si cette valeur vaut 0, seul le point gauche de l'intervalle sera considéré ; si elle vaut 1, les 2 points extrêmes de l'intervalle seront examinés ; si elle vaut 2, un troisième point de sortie des spirales sera également considéré (au milieu de la zone de sortie, découpant celle-ci en 2 sous-intervalles), etc.

- *Spirales… à concavité vers le haut ou à concavité vers le bas* (cf Figure 8*).*

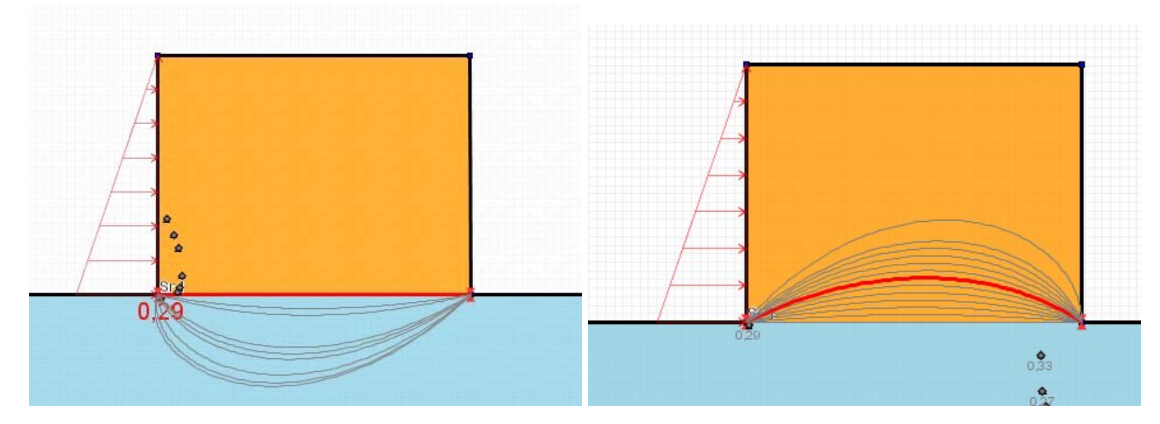


Figure 8 : exemples de spirales à concavité vers le haut et vers le bas

- *Précision sur le rayon* : elle définit la tolérance géométrique sur le point de sortie de la spirale du sol : elle correspond au rayon d'un disque autour du point de sortie théorique considéré. Si le point de sortie pour la spirale calculée se trouve en-dehors de ce disque, la spirale est considérée comme non aboutie (impossibilité géométrique). La valeur proposée par défaut pour ce paramètre est de 1 cm.
- *Exploration* : différents pas d'exploration sont possibles pour l'angle au centre des spirales logarithmiques. Les pas de 2,5, 5, 7,5 ou 10° permettent pour chaque couple (point d'entrée/point de sortie) une exploration systématique des valeurs possibles pour l'angle au centre, avec le pas considéré (la valeur proposée par défaut est un pas de 10°). Le dernier choix correspond au calcul d'une spirale unique pour chaque couple (point d'entrée/point de sortie) : l'angle au centre voulu doit alors être saisi en paramètre complémentaire (exemple sur la Figure 9).

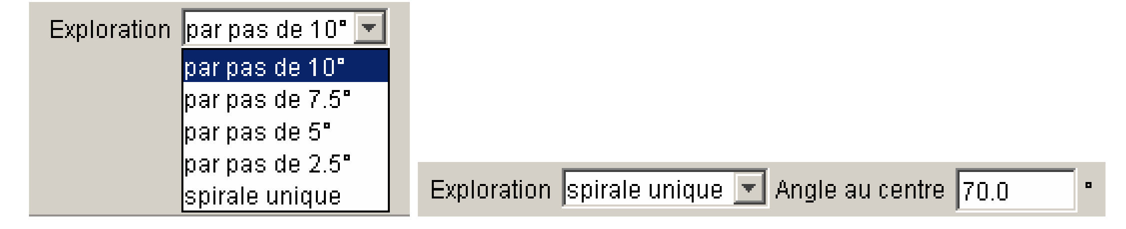


Figure 9 : types d'exploration pour les spirales logarithmiques

2.3 Exploitation des résultats d'un calcul selon la méthode du calcul à la rupture

2.3.1 Les résultats affichés par défaut

Après calcul selon la méthode du calcul à la rupture, les résultats affichés par défaut dans la zone graphique sont (Figure 10) :

- La valeur du coefficient XF (choisi par l'utilisateur dans les propriétés de la situation) et la valeur du coefficient de sécurité minimum obtenu pour l'ensemble des spirales calculées, en bas à gauche de la zone graphique ;
- La valeur du coefficient de sécurité obtenu pour chaque spirale calculée (affichée à côté de chaque pôle) ;
- La surface de rupture critique : en rouge sur le dessin. Le zoom est adapté automatiquement après calcul pour afficher les éléments relatifs à la surface de rupture critique (pôle, etc).

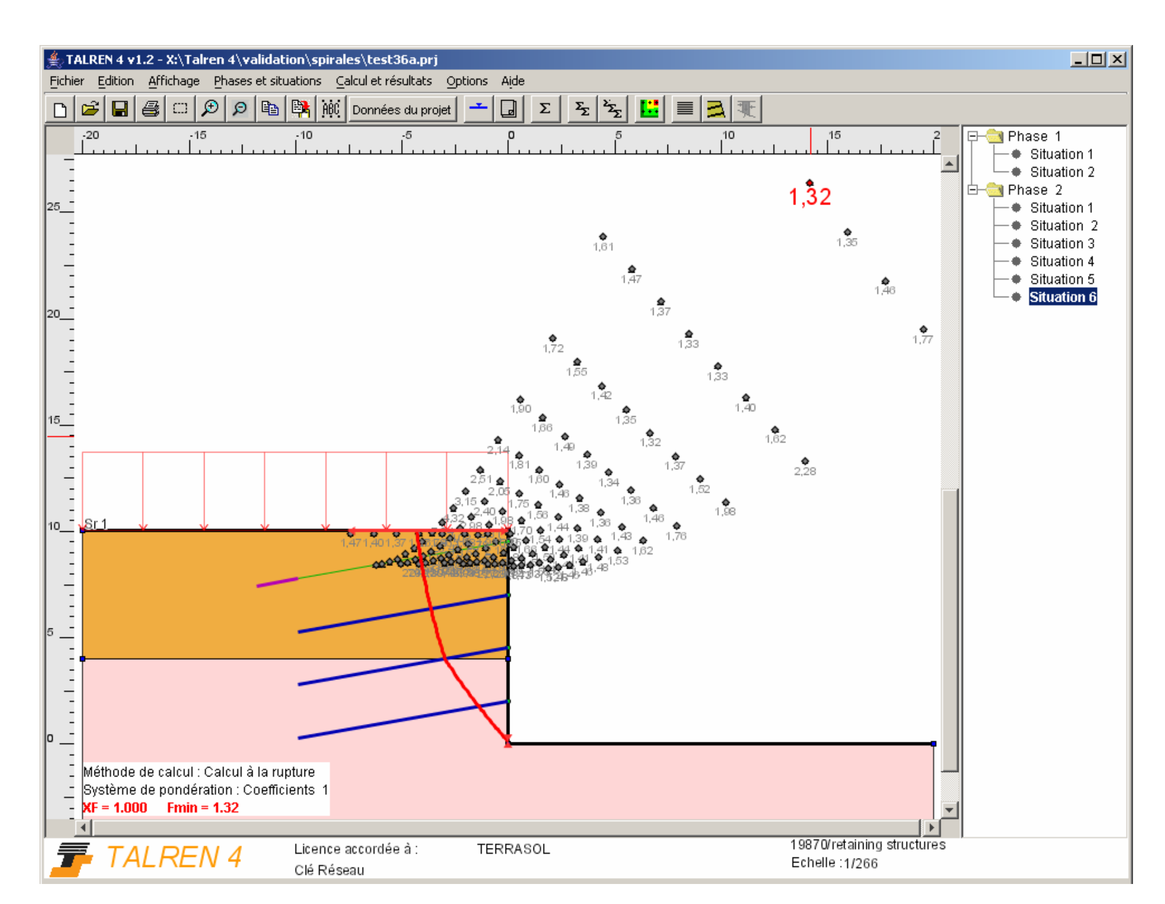


Figure 10 : résultats affichés par défaut après calcul d'une situation dans le cas de spirales logarithmiques

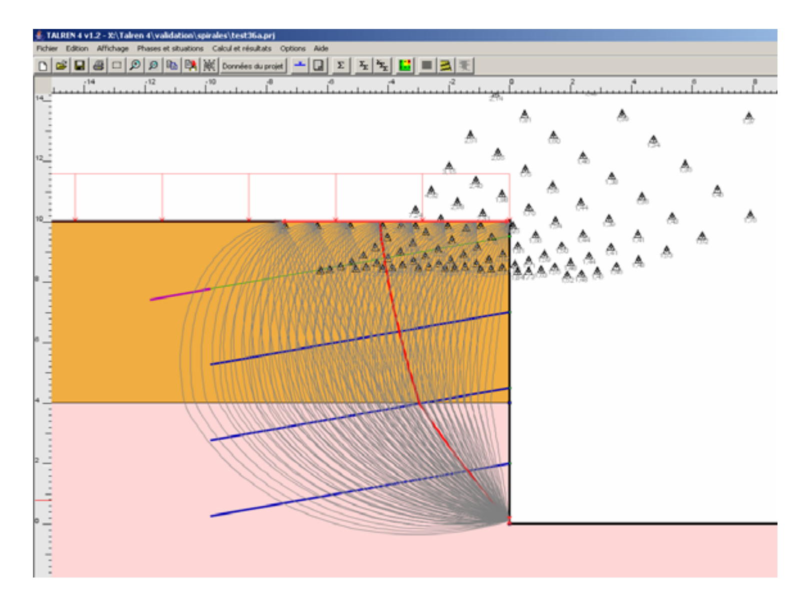


Figure 11 : exemple d'affichage de toutes les spirales calculées

2.3.2 L'affichage des résultats détaillés

Un exemple de tableau des résultats détaillés par surface de rupture est donné sur la Figure 12.

Résultats détaillés par surface (Spirales logarithmiques)

Exporter...

NUMSURF	X pôle(m)	Y pôle(m)	A(°)	MMOT	F-SOL	F-SURCH	F-TOTAL
36	-2.76	9.47	160	-294.579	996.000	998.000	998.00
37	-2.91	9.44	170	-338.25	996.000	998.000	998.00
38	-2.25	10	0	17324520	0.400	0.334	3.310
39	14.15	30.88	10	1824.611	0.382	0.321	3.236
40	6.36	19.09	20	946.414	0.373	0.316	3.222
41	3.67	15.17	30	639.004	0.374	0.320	3.295
42	2.3	13.23	40	482.376	0.382	0.329	3.404
43	1.43	12.07	50	380.225	0.400	0.348	3.604
44	0.81	11.32	60	306.58	0.431	0.377	3.900
45	0.34	10.79	70	246.98	0.479	0.423	4.361
46	-0.04	10.4	80	199.235	0.550	0.490	4.995
47	-0.36	10.12	90	156.083	0.661	0.595	6.016
48	-0.63	9.9	100	117.331	0.843	0.770	7.701
49	-0.87	9.74	110	81.608	1.181	1.104	10.893
50	-1.09	9.62	120	48.03	1.982	1.947	18.926
51	-1.28	9.53	130	15.572	6.064	6.295	58.632
52	-1.46	9.47	140	-14.696	996.000	998.000	998.00
53	-1.62	9.44	150	-43.519	996.000	998.000	998.00
54	-1.77	9.42	160	-70.543	996.000	998.000	998.00
55	-1.12	10	0	10359047	0.599	0.500	4.320
56	17.75	26.57	10	1175.387	0.530	0.451	3.968
57	8.46	16.95	20	651.846	0.484	0.419	3.737
58	5.28	13.78	30	471.585	0.453	0.397	3.614
59	3.66	12.21	40	378.809	0.435	0.386	3.550
60	2.65	11.29	50	319.31	0.427	0.383	3.560
61	1.95	10.69	60	276.849	0.427	0.388	3.631
62	1.42	10.28	70	242.68	0.436	0.400	3.784
63	1	9.99	80	215.896	0.454	0.420	3.982
64	0.66	9.78	90	191.664	0.481	0.449	4.284

OK Aide Légende F

Figure 12 : fenêtre des résultats détaillés par surface de rupture pour des spirales logarithmiques, méthode de calcul à la rupture

L'affichage des efforts dans les renforcements est analogue à celui obtenu après calcul par les autres méthodes de calcul.

L'affichage des résultats par tranches n'est pas accessible dans le cas de calculs effectués avec la méthode du calcul à la rupture.

3 ADDITIF A LA NOTICE TECHNIQUE (CHAPITRE C)

Ce chapitre a pour but de compléter le chapitre C du manuel Talren 4 avec les aspects théoriques spécifiques à la méthode du calcul à la rupture.

3.1 *Méthode du calcul à la rupture*

3.1.1 Présentation générale

La méthode du calcul à la rupture proposée dans Talren 4 représente une approche cinématique par l'extérieur de la charge de rupture des ouvrages géotechniques. Cette approche est développée dans le cadre de la théorie générale du calcul à la rupture qui a été formalisée par J. Salençon. Pour un exposé détaillé de la théorie, le lecteur pourra se reporter aux références bibliographiques (paragraphe 3.4 de ce document).

L'approche cinématique par l'extérieur repose sur la dualisation des équations d'équilibre obtenue en appliquant le principe des travaux virtuels. Introduisant un champ de vitesse cinématiquement admissible (c'est-à-dire vérifiant les conditions limites en vitesse), on compare la puissance P_e des efforts extérieurs au système dans ce champ de vitesse à un majorant P_{rm} de la puissance des sollicitations internes calculée dans le même champ de vitesse.

Le majorant (P_{rm}) est défini en référence au critère de rupture du matériau. Pour que la comparaison soit significative, la valeur du majorant P_{rm} doit demeurer finie. Cette condition conduit à ne choisir que des champs de vitesse pertinents pour le critère considéré : champs de vitesse tels qu'il existe un majorant fini pour P_{rm} (puissance résistante maximale).

L'approche cinématique par l'extérieur établit que la relation $P_e \leq P_{rm}$ est vérifiée quel que soit le champ de vitesse cinématiquement admissible.

Si à l'inverse on peut établir un champ de vitesse cinématiquement admissible tel que

$$P_{rm} < P_e \qquad \text{(inégalité 1)}$$

l'instabilité du système est certaine : aucun équilibre n'est possible dans la situation examinée.

L'approche par l'extérieur de la théorie du calcul à la rupture permet donc de répondre sans aucune ambiguïté sur la non-stabilité du système quand la condition (inégalité 1) est vérifiée. Dans les autres cas elle fournit uniquement une présomption d'équilibre : dans le cadre général de la théorie du calcul à la rupture, l'approche cinématique par l'extérieur doit être complétée par l'approche statique par l'intérieur pour réduire cette indétermination.

L'efficacité de l'approche cinématique tient au choix conjoint du majorant P_{rm} le meilleur pour la puissance des sollicitations résistantes et de champs de vitesse pertinents pour le critère de rupture considéré.

Dans Talren 4, l'approche cinématique du calcul à la rupture est faite dans le cas particulier:

- de mouvements rigidifiants (champ de vitesse représentant le déplacement d'un bloc supposé rigide par rapport au reste du massif supposé fixe);
- du critère de rupture Mohr Coulomb : $|\tau| \leq c + \sigma \tan\varphi$.

J. Salençon a établi que, dans ce cas particulier, les mouvements de blocs rigides délimités par une succession d'arcs de spirale logarithmique $r(\theta) = r_0\, e^{\theta \tan\phi}$ de même pôle fournissaient la majoration optimale de la puissance résistante P_{rm} et qu'il était possible de restreindre l'analyse à ces champs de vitesse rigidifiants. Les arcs de spirale successifs à considérer sont définis par l'angle de frottement de chacune des couches rencontrées le long de la frontière du bloc (Figure 13).

Dans ce cadre particulier :

- le champ de vitesse est défini par le pôle $\mathcal{P}$ des arcs de spirale et le vecteur vitesse de rotation angulaire ω du bloc; Il faut noter que les vitesses, perpendiculaires au rayon vecteur, ne sont pas tangentes à la frontière du bloc ; cette frontière ne peut donc pas être assimilée à une surface de glissement.
- le majorant (P_{rm}) des efforts résistants est : $P_{rm} = \omega M_{rm}$ où M_{rm} est lui-même un majorant du moment des efforts résistants le long de la frontière du bloc en mouvement.
- la puissance des efforts extérieurs appliqués au système (P_e) est $P_e = \omega M_e$ où M_e est égal au moment des efforts extérieurs appliqués au bloc.

Dans ces conditions, le rapport (P_{rm}/P_e) est égal au rapport (M_{rm}/M_e).

Coussy (1977) a proposé de dénommer "coefficient de rupture" cette grandeur, elle est également parfois appelée "facteur de confiance".

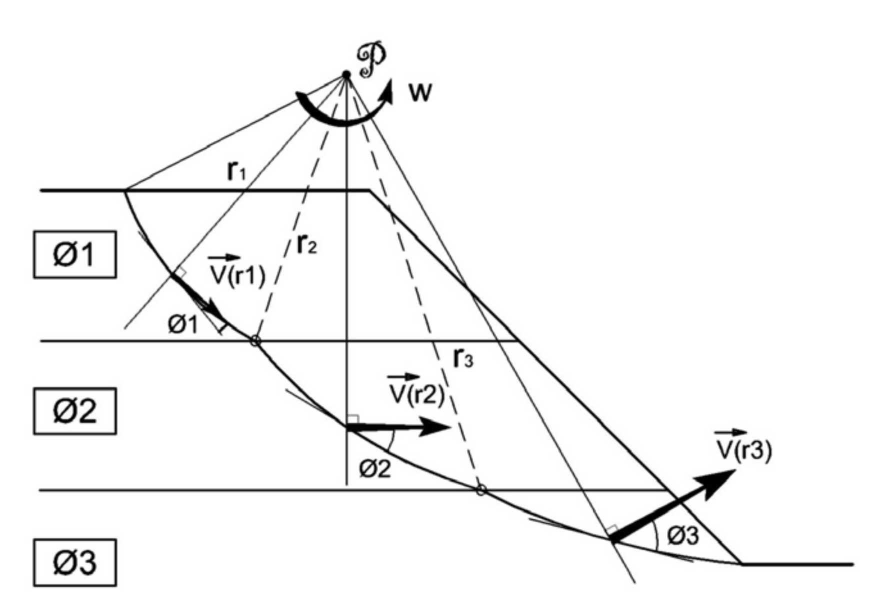


Figure 13 : Arcs successifs de spirales

3.1.2 Mise en oeuvre

Chaque bloc rigide (mouvement rigidifiant) est défini par le pôle commun $\mathcal{P}$ des arcs de spirale et l'angle au centre θ. La frontière du bloc est découpée en N éléments successifs, dont chacun correspond à un angle au centre θ/N (N choisi par l'utilisateur : paramètre "discrétisation"). Chaque élément d'arc de spirale sous-tendu par l'angle θ/N est assimilé au segment de droite de mêmes extrémités.

La frontière du bloc présente un point anguleux à chaque limite séparant deux couches d'angle de frottement distinct.

L'arc de spirale devient un cercle dans une couche purement cohérente ($\phi = 0$).

Quand le pôle $\mathcal{P}$ est rejeté à l'infini, les arcs de spirale successifs deviennent des segments de droite et constituent une ligne brisée.

Tous les moments sont évalués au pôle $\mathcal{P}$ de la spirale. La convention de signe adoptée est le sens trigonométrique direct. Pour une spirale à concavité vers le haut, un moment positif est moteur et un moment négatif est déstabilisateur.

Certains moments peuvent être de signe positif ou négatif. Il s'agit de :

- M(W) : le moment des forces de gravité appliquées à l'ensemble des tranches verticales du bloc (ce moment inclut l'effet des accélérations sismiques éventuelles); M(W) est négatif dans tous les équilibres de type butée ;
- M(u) : le moment des forces de pression u appliquées au contour du bloc (la succession des arcs de spirale étant prolongée à ses extrémités amont et aval par deux demi-droites verticales) ;
- $M(f_i, m_i)$: la contribution de chaque surcharge ponctuelle linéaire appliquée au bloc considéré (ce moment inclut l'effet des accélérations sismiques éventuelles) ;
- $M(q_i)$: la contribution de chaque surcharge répartie q_i ; cette contribution est comptabilisée uniquement entre les extrémités amont et aval du bloc (ce moment inclut l'effet des accélérations sismiques éventuelles) ;
- $M(t_i)$: la contribution de chaque tirant recoupant la frontière du bloc ;
- $M(b_i)$: la contribution de chaque buton installé entre les extrémités amont et aval du bloc.

Deux moments sont toujours résistants :

- M(c) : le moment dû à la cohésion ; on peut noter que ce terme représente le majorant du moment des efforts résistants selon le critère de Mohr-Coulomb pour le mouvement du bloc : $M_c = \int c \cos\phi \, r \, ds$ (Figure 14) ;
- $M(R_j)$: la contribution des clous qui recoupent la frontière du bloc.

Pour des raisons de commodité, le facteur M_{rm}/M_e est remplacé par un facteur équivalent $\Gamma = |M^-|/M^+$, où M^- est la somme de tous les moments résistants dans la situation considérée et M^+ la somme de tous les moments moteurs.

Dans le cas général, M- inclut toujours M_{rm} : $|M^-| = M_{rm} + M^-_{autre}$,

$M_{rm} / M_e < 1$

$\Rightarrow M_e - M_{rm} > 0$

$\Rightarrow M^+ - M^-_{autre} - M_{rm} > 0$

$\Rightarrow M^+ - |M^-| > 0$

$\Rightarrow |M^-| / M^+ < 1$

Réciproquement

$|M^-| / M^+ < 1$

$\Rightarrow M^+ - |M^-| < 1$

$\Rightarrow M^+ - M^-_{autre} - M_{rm} > 0$

$\Rightarrow M_e - M_{rm} > 0$

$\Rightarrow M_{rm} / M_e < 1$

On a donc bien : $M_{rm} / M_e < 1 \quad \Leftrightarrow \quad |M^-| / M^+ < 1$

Le facteur Γ = |M-|/M+ a donc la même signification que le facteur d'instabilité Γ :

- ✓ Si $\Gamma < 1$: l'équilibre est impossible, l'ouvrage est instable.
- ✓ Si $\Gamma > 1$: l'ouvrage est potentiellement stable.

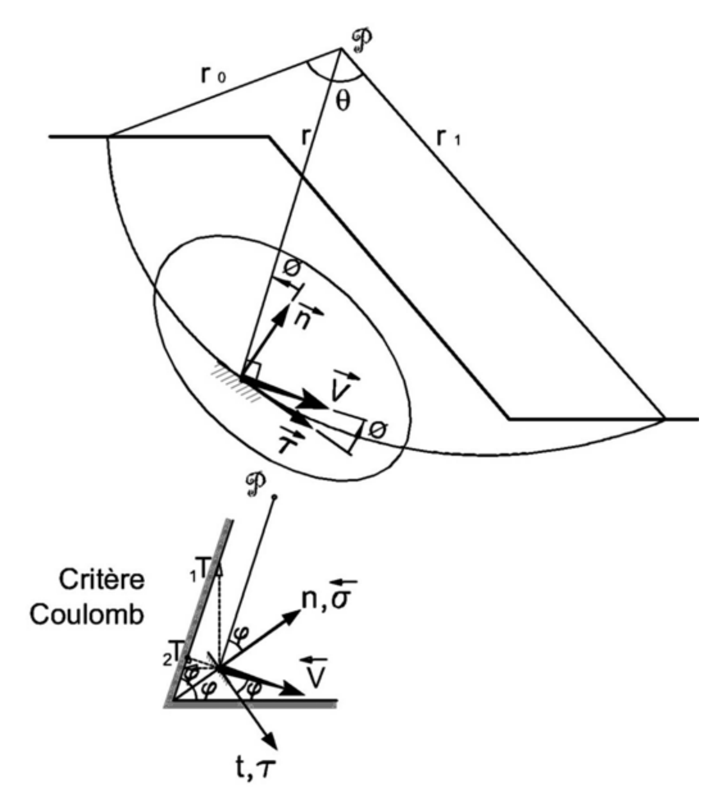


Figure 14 : Critère de Mohr-Coulomb

M- regroupe les moments M(c) et M(R_j), qui sont toujours résistants et les contributions résistantes des autres moments. Pour cette attribution, c'est le terme composé {M(W) + M(u)} qui est considéré globalement résistant ou moteur et non individuellement chaque terme M(W) ou M(u). Ce choix assure la cohérence des calculs entre les approches en contraintes totales ou effectives.

L'attribution M- ou M+ est faite pour les autres termes individuellement : par élément de surcharge linéaire ou répartie, par tirants et par buton et en considérant leur contribution totale et non une contribution par composante.

Tous les moments sont calculés en introduisant les coefficients de sécurité partiels applicables (voir le chapitre C du manuel complet).

Dans le principe de calcul selon la méthode aux coefficients de sécurité partiels, le résultat du calcul permet de vérifier si les pondérations appliquées aux efforts et aux résistances conduisent à une instabilité de la structure géotechnique. L'instabilité est démontrée lorsque la valeur minimale de Γ pour tous les blocs examinés est inférieure à 1.

3.1.3 Lien avec le calcul traditionnel

La valeur du coefficient de confiance Γ ne peut pas être comparée directement au coefficient de sécurité F calculé par les méthodes de Fellenius, Bishop ou des perturbations. Dans ces trois méthodes, le coefficient de sécurité F calculé représente la sécurité supplémentaire à appliquer aux valeurs de calcul des paramètres de résistance au cisaillement pour obtenir l'équilibre : pour les valeurs de calcul équivalentes $\tan\phi_d = \tan\phi/(F.\Gamma_\phi)$ et $c_d = c/(F.\ \Gamma_c)$ l'équilibre est vérifié en moment (Fellenius ou Bishop) ou en bilan global (perturbations).

Dans une situation donnée, pour pouvoir comparer le calcul à la rupture à un calcul de type traditionnel, il faut donc chercher la pondération supplémentaire XF à introduire simultanément sur $\tan\phi$ et sur c pour être en limite de stabilité (F = 1). Cette valeur XF peut être comparée à la valeur du coefficient global calculée par l'une des trois autres méthodes.

La démarche d'une telle approche est illustrée dans le cas simplifié de la Figure 15 : pour une situation où le coefficient de rupture est F = 2,39, le coefficient de sécurité dont la définition est comparable à celle des méthodes traditionnelles est trouvé égal à XF = 1,27 (pour un coefficient de sécurité calculé selon Bishop très proche : F = 1,26).

Des comparaisons systématiques faites selon cette approche montrent que le coefficient XF demeure généralement très proche des valeurs F établies par les méthodes de calcul Bishop ou perturbations.

L'intérêt de la méthode issue du calcul à la rupture tient :

- A son caractère rigoureux qui fournit une appréciation de la sécurité d'un ouvrage sans autre hypothèse que le choix du critère de rupture associé aux matériaux ;
- Au fait que cette appréciation de la stabilité se fait par enveloppe supérieure. La charge de rupture est toujours définie par excès, ce qui caractérise de manière forte cette approche par rapport aux méthodes Fellenius, Bishop ou des perturbations qui du fait de l'introduction d'hypothèses complémentaires ne permettent pas de conclure sur le caractère par excès ou par défaut de l'estimation obtenue de la charge de rupture ;
- Sa capacité à prendre en compte des situations où les méthodes traditionnelles sont généralement en défaut : équilibres de butée, chargements inclinés par rapport à la verticale.

Exemple

Talus H = 7 m, β = 49,4°

Couche unique ϕ = 20° , c = 10 kPa

Calcul à la rupture

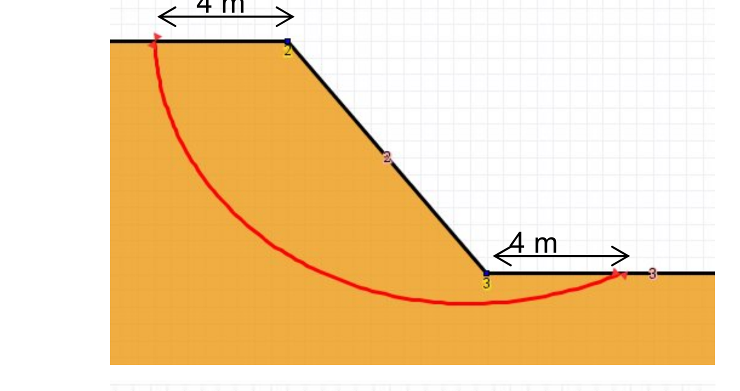
Spirale angle au centre 110°

Calcul sans pondération partielle

Γ_ϕ = 1, Γ_c = 1

Résultat : F = 2,39

(coefficient de rupture
ou facteur de confiance)



Calcul à la rupture

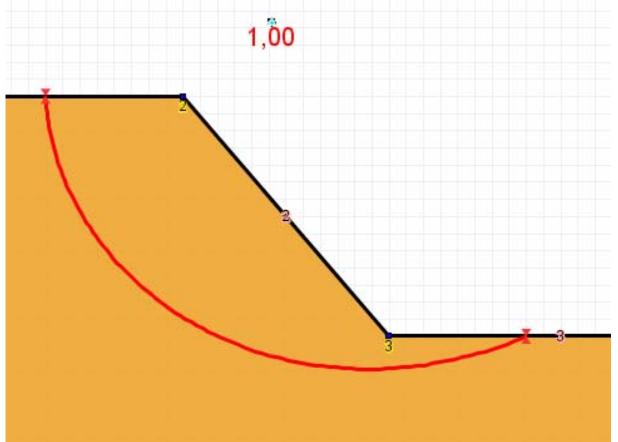
Introduction de la pondération supplémentaire XF sur tanϕ et c

Γ_ϕ = XF, Γ_c = XF

Recherche de XF pour obtenir F = 1

Résultat : XF = 1,27

(coefficient de sécurité "équivalent" à ceux calculés par les méthodes de Fellenius, Bishop ou des perturbations)



Comparaison à une méthode traditionnelle

Calcul Bishop

Cercle de mêmes extrémités et angle au centre 110 °

Γ_ϕ = 1, Γ_c = 1

Résultat : F = 1,26

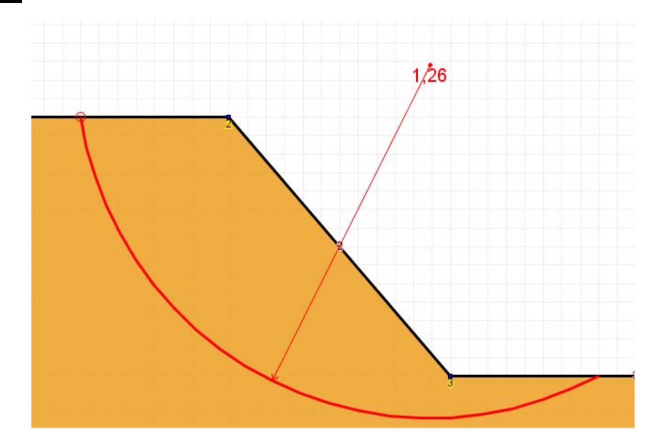


Figure 15 : Equivalence entre le calcul à la rupture et le calcul traditionnel

3.2 Spécificités du calcul à la rupture dans l'application des méthodes de base propres à Talren

3.2.1 Les surfaces de rupture spirales

Ces surfaces sont considérées uniquement en association avec la théorie du calcul à la rupture. Chaque surface est constituée par la succession des arcs de spirale (de même pôle) associés à chaque couche (ce type de surface sera parfois appelé "spirale" dans ce manuel par simplification). Cet ensemble peut être défini par ses intersections amont et aval avec le talus (points d'entrée et sortie) et la valeur de l'angle au centre θ (angle entre les rayons initial et final de la série des arcs). Ces données sont utilisées pour déterminer la position du pôle commun à tous les arcs de spirale constituant la frontière du bloc (mouvement rigidifiant cf chapitre 3.1.1). Elles permettent de paramétrer l'ensemble des surfaces à explorer.

La recherche de la valeur F minimale du facteur de confiance sur un ensemble de blocs se fait par balayage de l'ensemble {point d'entrée, point de sortie, angle au centre θ}.

Les points d'entrée et de sortie des spirales sont définis par balayage d'un secteur amont et d'un secteur aval (Figure 16).

- Chaque secteur est défini en choisissant une origine et une extrémité (définissant un intervalle) sur l'enveloppe du talus. En considérant le contour du talus orienté de la gauche vers la droite, l'abscisse curviligne du point origine du secteur doit être inférieure ou égale à celle du point extrémité. Le secteur peut s'étendre à plusieurs segments contigus de la ligne polygonale définissant l'enveloppe du talus.
- Le point d'entrée (respectivement de sortie) de la spirale est positionné en référence à un découpage du secteur amont (respectivement aval) en intervalles de longueur constante. Le nombre d'intervalles est choisi par l'utilisateur pour chacun des deux secteurs (voir le chapitre 2.2.3 de ce document pour le détail de la définition des paramètres). Si le découpage est nul, seule l'origine du secteur est utilisée.

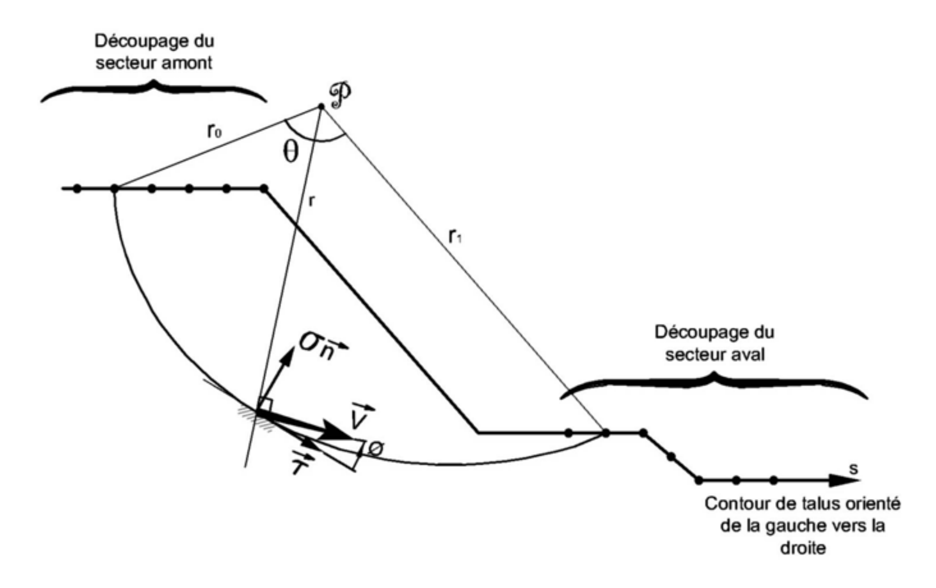


Figure 16 : Balayage pour la recherche des spirales : points d'entrée et de sortie



Le balayage des angles θ est réalisé sur l'intervalle {0, 180°} (Figure 17).

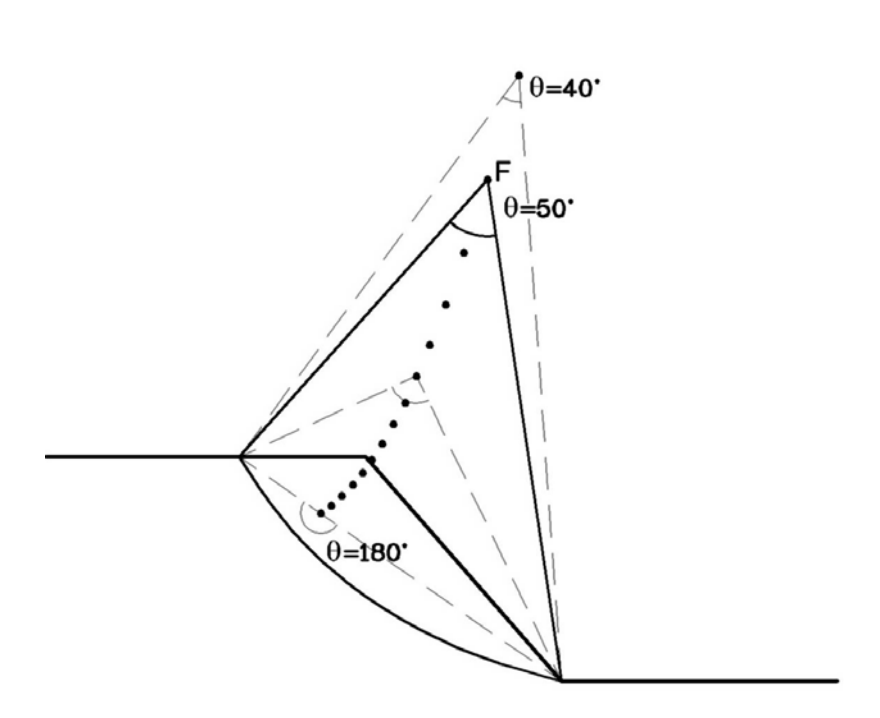


Figure 17 : Balayage pour la recherche des spirales : angles θ

Pour θ = 0, le pôle est rejeté à l'infini et les arcs de spirale deviennent une ligne polygonale brisée : si de plus l'angle de frottement est constant le long de la frontière, la surface de rupture est alors un segment, l'équilibre examiné est celui d'un coin. Lorsque θ est supérieur à 0 et que l'angle de frottement est nul le long de la frontière, la surface de rupture est un cercle.

La recherche du pôle P associé à chaque jeu de paramètres est menée de manière itérative et contrôlée par la précision imposée, sous forme de disque autour du point d'arrivée) : la précision définit le rayon du cercle centré sur le point de sortie théorique où doit se trouver l'extrémité du dernier segment (Figure 18).

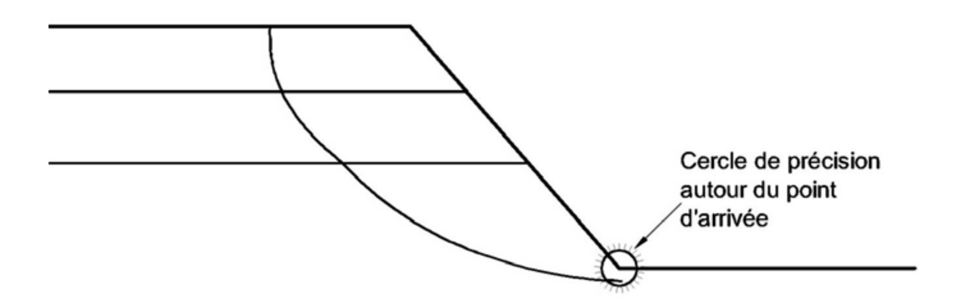


Figure 18 : Précision autour du point d'arrivée

Il est possible qu'il n'existe aucune surface de rupture entre les points d'entrée et sortie pour un angle θ donné, soit parce que la courbe sort du talus, soit parce que les contraintes qu'impose la succession des angles de frottement de chacune des couches traversées conduisent à une impossibilité géométrique. La spirale est alors non aboutie.

Il est possible dans certains cas d'améliorer la convergence du processus en augmentant la discrétisation (découpage de l'angle au centre θ en N intervalles égaux) ou en augmentant le rayon du disque de précision.

Seules les spirales abouties sont l'objet du calcul de stabilité et fournissent des résultats de calcul accessibles de manière graphique.

La discrétisation contrôle la précision avec laquelle sont évalués les termes M(W+u) et M(c).

Les surfaces de rupture peuvent être de deux types différents, selon le choix fait par l'utilisateur :

- Surfaces à concavité vers le haut (concavité positive); le pôle est placé au dessus de la surface de rupture (Figure 19a);
- Surface à concavité vers le bas (concavité négative), le pôle est placé sous la surface de rupture (Figure 19b).

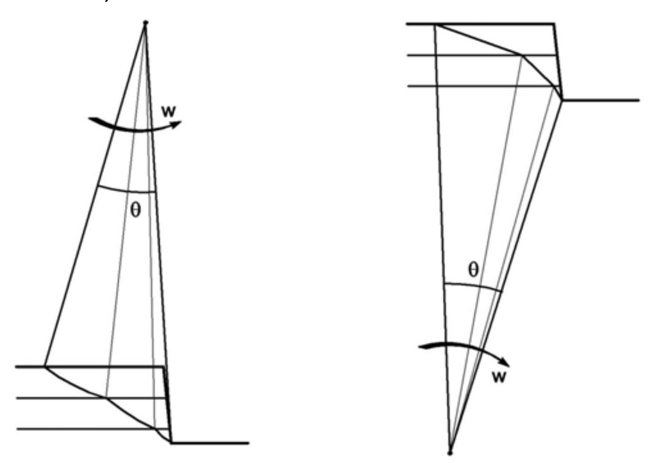


Figure 19 a et b : Concavités vers le haut (a) et vers le bas (b)

Il y a continuité entre les deux familles pour le paramètre θ = 0. Ainsi, si une recherche sur des spirales à concavité positive aboutit à une surface minimale de paramètre θ = 0, il est recommandé d'explorer également la famille des spirales de concavité opposée (et réciproquement).

Un exemple est offert par l'analyse de la stabilité d'un gabion cellulaire soumis à une poussée différentielle :

- ✓ La recherche sur les spirales à concavité positive aboutit au mécanisme de glissement plan sur la base (Figure 20a) ;
- ✓ L'extension de la recherche aux spirales à concavité négative aboutit à un mécanisme de rupture interne au gabion. Ce mécanisme est celui dénommé X par Brinch-Hansen (1953) (Figure 20b).

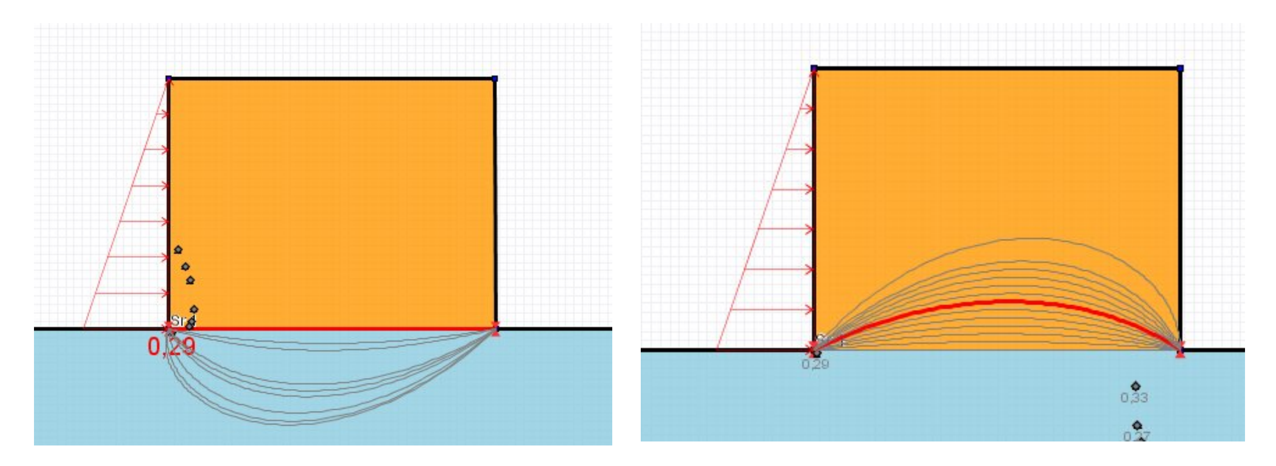


Figure 20 a et b : Continuité du balayage avec spirales à concavité positive et spirales à concavité négative

Remarque : surplombs

La limitation des surplombs qui existe dans le cas des surfaces de rupture circulaires (cf chapitre C du manuel complet) ne s'applique pas aux surfaces de rupture traitées par la méthode du calcul à la rupture. Aucune restriction n'est faite sur la position du pôle des arcs de spirales successifs et certains tronçons peuvent donc être en surplomb quand le pôle est à une cote inférieure à celle du point d'entrée (Figure 21). La théorie du calcul à la rupture permet de traiter ces situations sans aucune hypothèse complémentaire.

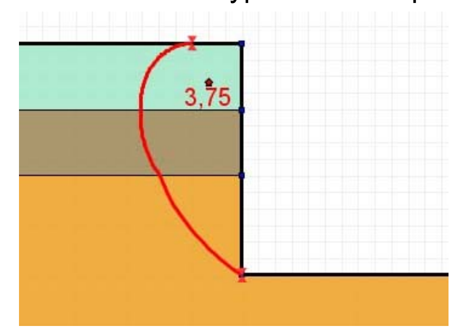


Figure 21 : Exemple de frontière avec surplomb balayée par le calcul à la rupture

3.2.2 Les caractéristiques de sol : courbes intrinsèques non linéaires

Cette option ne peut pas être appliquée avec la méthode du calcul à la rupture.

3.2.3 La prise en compte des surcharges dans le calcul à la rupture

La prise en compte des surcharges est un problème délicat, général à tous les programmes de calcul de stabilité reposant sur une méthode des tranches car l'incidence d'une surcharge sur la répartition des contraintes sur la surface de rupture (répartition qui, en tout état de cause, n'est pas déterminée de façon exacte pour le massif non surchargé) dépend de la déformabilité du massif.

Les difficultés précédentes n'existent pas dans la méthode du calcul à la rupture qui est apte à prendre en compte l'influence de tout type de chargement appliqué au bloc étudié (mouvement rigidifiant).

Toute surcharge linéique appliquée au bloc ou surfacique appliquée entre les extrémités amont et aval de la frontière du bloc (mouvement rigidifiant, cf chapitre 3.1.1) est intégrée dans le bilan des moments moteur et résistant par rapport au pôle commun des arcs de spirale successifs (Figure 22).

Aucune hypothèse de diffusion n'est nécessaire à la mise en œuvre de la méthode.

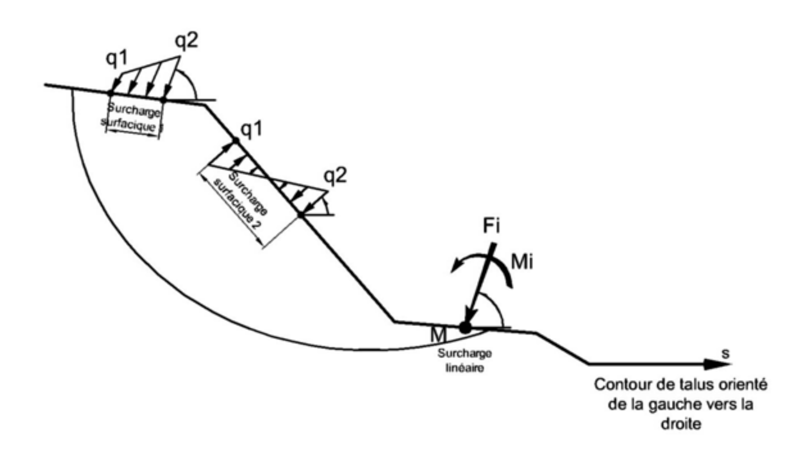


Figure 22 : Prise en compte des surcharges dans le calcul à la rupture

3.2.3.1 Surcharges réparties

Les surcharges surfaciques doivent nécessairement être appliquées à des segments de l'enveloppe du talus (voir aussi le manuel d'utilisation), comme pour les autres méthodes de calcul. Elles ne peuvent pas être appliquées à d'autres segments, non placés sur l'enveloppe du talus.

Dans le cas de la méthode de calcul à la rupture, il est possible de définir des surcharges surfaciques inclinées (et non nécessairement verticales) : l'inclinaison doit demeurer comprise entre 0 et 180°; les valeurs q1 et q2 peuvent être positives ou négatives.

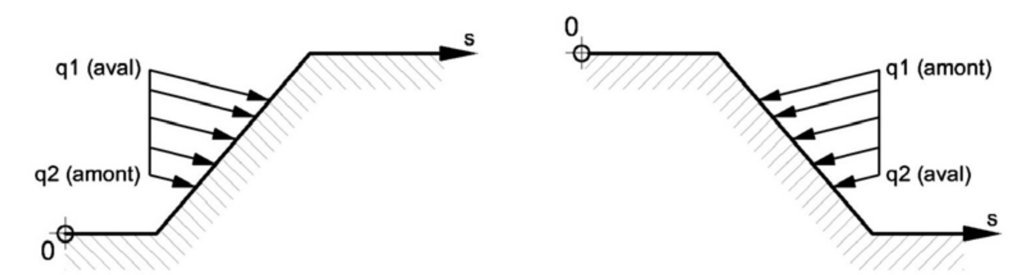


Figure 23 : Définition des surcharges surfaciques dans le calcul à la rupture

Si la frontière d'un bloc a une de ses extrémités sur le segment (ou groupe de segments contigus) d'application de la surcharge, seule une fraction de cette surcharge est prise en compte. Les caractéristiques de la surcharge partielle appliquée au bloc sont alors interpolées en fonction de l'abscisse curviligne, à partir des paramètres fournis aux extrémités de la surcharge (comme c'est le cas pour les autres méthodes de calcul et surfaces de rupture).

3.2.3.2 Surcharges linéaires

Elles peuvent s'appliquer à l'intérieur du bloc étudié.

Il n'y a pas de remarque particulière, sauf pour la diffusion : la diffusion des surcharges linéiques n'est pas prise en compte dans le cas de la méthode de calcul à la rupture.

3.2.3.3 Contribution motrice ou résistante des surcharges

Le caractère moteur ou résistant des surcharges (surfaciques et linéiques) est déterminé surcharge par surcharge, pour l'ensemble de la contribution du ou des segments de talus qui la composent. Cette évaluation est faite globalement et non composante par composante.

3.2.4 La prise en compte des renforcements dans le calcul à la rupture

3.2.4.1 Combinaison des critères de rupture : application du principe du travail maximal.

Au point d'intersection surface de rupture-inclusion, le déplacement relatif δ des deux parties d'inclusion, lors de la rupture de celle-ci, est supposé parallèle à la surface de rupture dans les méthodes des tranches et la méthode des perturbations.

Dans la méthode du calcul à la rupture, le vecteur vitesse est incliné à l'angle ϕ avec la frontière du bloc (mouvement rigidifiant, cf chapitre 3.1.1) : le bloc examiné tendant à "décoller" du reste du massif.

Remarque 1 : dans le cas d'une surface de rupture circulaire (ou celui d'un bloc analysé par la méthode du calcul à la rupture), on peut observer que le moment stabilisateur de l'inclusion est maximal par rapport au centre du cercle (ou du pôle commun aux arcs de spirale) lorsque la projection de l'effort T (T_n,T_c) est maximale sur la direction du déplacement δ.

Remarque 2 : dans le cas du calcul à la rupture, l'application des règles détaillées dans le chapitre C.4.3 du manuel complet revient à déterminer la contribution résistante maximale du renforcement dans le mécanisme de bloc. Le renforcement est ainsi traité de manière identique au sol en établissant une borne supérieure de la puissance résistante dans le mécanisme considéré. Le calcul à la rupture constitue donc le cadre formel commun à ces deux étapes.

3.2.4.2 Introduction des renforcements dans les équations donnant Γ

Dans la méthode du calcul à la rupture, aucune redistribution des efforts dus aux renforcements n'est mise en œuvre.

La contribution des renforcements est intégrée au bilan des moments moteurs M+ et résistants M- qui servent à calculer le coefficient de rupture F.

Les contributions des clous sont toujours considérées résistantes dans le mécanisme étudié.

Les contributions des autres renforcements (tirants, butons, bandes) sont toujours celles associées au développement d'un effort de traction. Les contributions de ces éléments peuvent être résistantes ou motrices selon la configuration de la frontière du bloc (mouvement rigidifiant, cf chapitre 3.1.1). Cette attribution est toujours faite élément par élément, pour chacune des familles de renforcement concernées.

3.2.4.3 Spécificités relatives aux clous

- Bien qu'aucune raison théorique ne le justifie, le travail des inclusions en compression n'est pas permis explicitement dans TALREN avec les méthodes des tranches ou des perturbations (cf l'introduction de l'angle critique θ_{cr}).

  Le cadre formel rigoureux du calcul à la rupture a fait abandonner ce choix pour les analyses relatives à des blocs délimités par des arcs de spirales logarithmiques. Dans une analyse de ce type, on suppose que le domaine de stabilité de chaque clou est totalement symétrique par rapport à l'origine (T_n = 0, T_c = 0) et on lui applique strictement le critère de recherche de la contribution maximale résistante. Dans certains cas, la contribution résistante maximale est obtenue pour une sollicitation du clou en compression.
- Avec la méthode du calcul à la rupture, le choix d'un angle critique θ_{cr} non nul n'est pas recommandé.

3.2.4.4 Spécificités relatives aux tirants

Par souci de conformité aux recommandations TA 86, un tirant précontraint ne travaille qu'en traction pure (y compris avec la méthode du calcul à la rupture).

3.2.4.5 Spécificités relatives aux bandes

En accord avec les recommandations spécifiques en vigueur, les armatures par bandes ne travaillent qu'en traction pure (y compris avec la méthode du calcul à la rupture).

3.2.4.6 Spécificités relatives aux pieux-clous

Avec la méthode du calcul à la rupture, la contribution de ces inclusions est obtenue par application stricte de la recherche de la contribution maximale résistante.

3.3 Compatibilité des types de données avec la méthode du calcul à la rupture

Nous donnons dans le tableau suivant les compatibilités entre les types de données et la méthode du calcul à la rupture pour les spirales logarithmiques.

Option	**Types de données**	**Calcul à la rupture**
Hydraulique	Pressions interstitielles	●
	Nappe extérieure	●
Sol	Courbe intrinsèque linéaire	●
	Courbe intrinsèque non-linéaire	❍
	Anisotropie de cohésion	●
Sismique	Accélérations sismiques	●
Surcharges	Réparties verticales	●
	Réparties avec inclinaison	●
	Linéaires sans diffusion	●
	Linéaires avec diffusion	❍ (sans objet)
	Moments additionnels	●
Renforcements	Clouage	●
	Tirants	●
	Bandes	●
	Butons	●

● : Méthode compatible avec l'option
○ : Méthode incompatible avec l'option

Tableau 1 : Compatibilités entre les types de données et le calcul à la rupture

3.4 Bibliographie spécifique à la méthode du calcul à la rupture

SALENCON J. Calcul à la rupture et analyse limite, Presses de l'ENPC, 1983

COUSSY O. – SALENCON J. Analyse de la stabilité des ouvrages en terre par le calcul à la rupture - Annales des Ponts et Chaussées, 4e trimestre 1979.

4 NOUVEAUX EXEMPLES DETAILLES (TUTORIAUX)

Ce chapitre a pour but de compléter le chapitre D du manuel Talren 4 avec des exemples détaillés d'application de la méthode du calcul à la rupture.

4.1 Tutorial 5 : reprise des 3 premiers tutoriaux du chapitre D du manuel avec la méthode du calcul à la rupture

Il s'agit dans ce tutorial de reprendre les 3 exemples précédents avec la méthode du calcul à la rupture, afin de familiariser l'utilisateur de Talren 4 avec cette méthode de calcul, et de comparer les résultats obtenus avec les méthodes Bishop/perturbations d'une part, et avec la méthode du calcul à la rupture d'autre part.

Nota : le tutorial 4 portait sur des surfaces de rupture quelconques, qu'il n'est pas possible de simuler avec la méthode du calcul à la rupture (spirales logarithmiques). Ce tutorial 4 n'est donc pas repris ici.

4.1.1 Tutorial 1 avec calcul à la rupture

On effectuera ici la comparaison pour la dernière phase (phase permanente).

La situation "de référence" sera la première situation de cette phase (calcul selon Clouterre / ouvrage courant / combinaison fondamentale, recherche automatique) : le calcul avec la méthode de Bishop donnait pour cette situation F = 1,03.

- Après avoir rouvert le fichier tutorial1.prj, sélectionner la situation 1 de la dernière phase.
- Cliquer sur son libellé avec le bouton droit de la souris et sélectionner "Dupliquer".
- Modifier les propriétés de la nouvelle situation ainsi créée, conformément aux deux figures suivantes, pour effectuer un calcul suivant la méthode du calcul à la rupture.

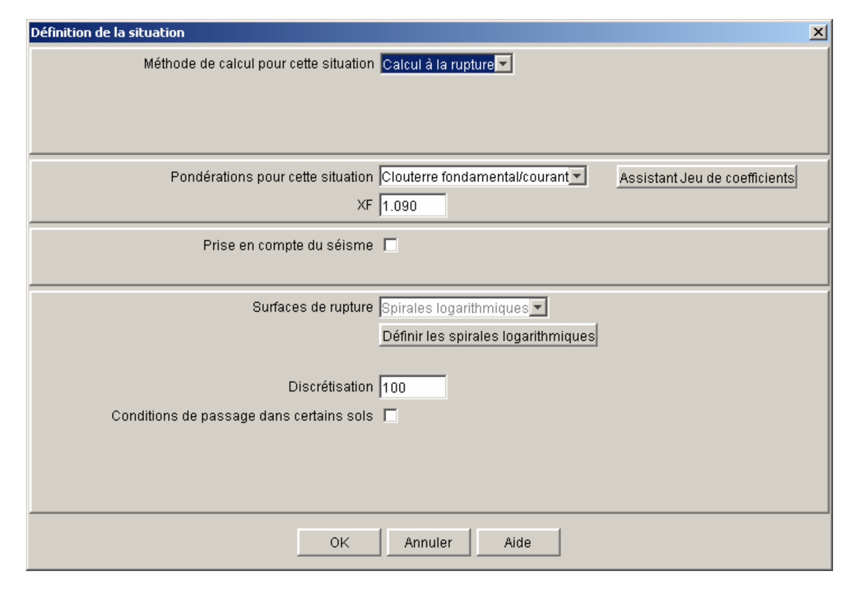


Figure 24 : Tutorial 1 / Paramètres de la situation 4 de la phase 4 (calcul à la rupture)

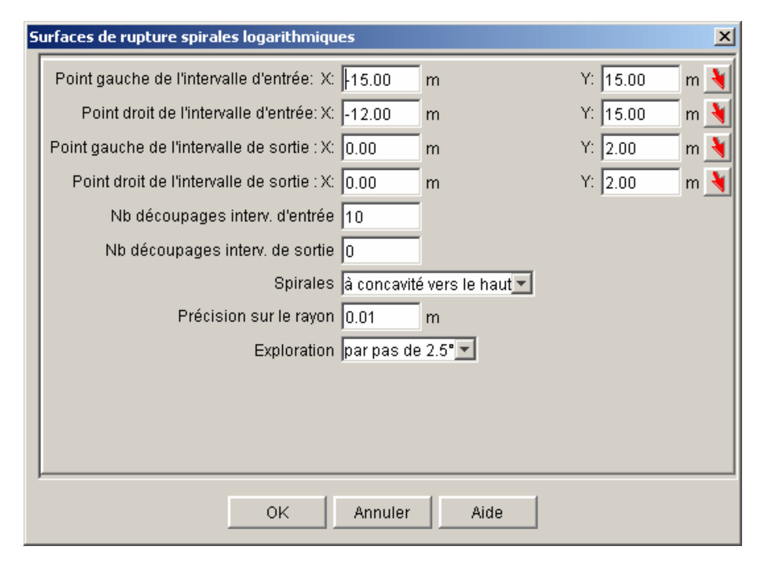


Figure 25 : Tutorial 1 / Paramètres de la situation 4 de la phase 4 (définition des spirales logarithmiques)

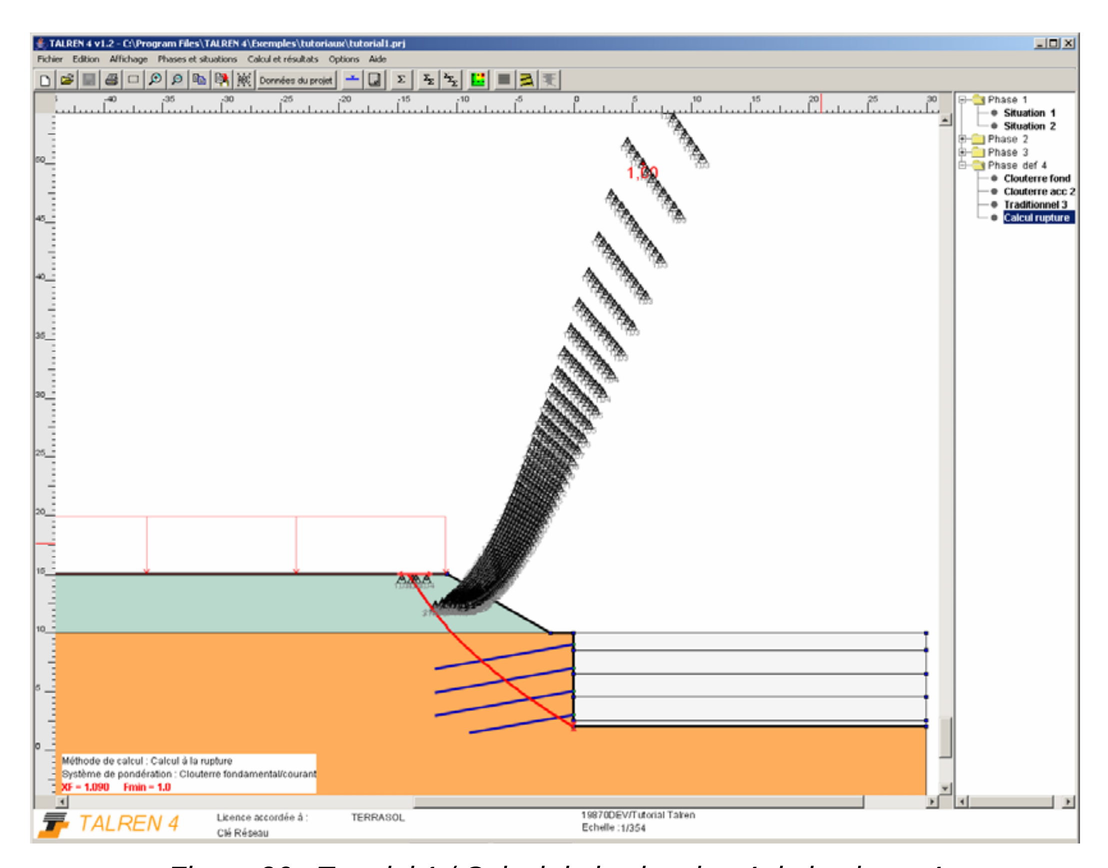


Figure 26 : Tutorial 1 / Calcul de la situation 4 de la phase 4 (calcul à la rupture)

Le coefficient XF permettant d'obtenir F = 1 est XF = 1,09.

Nota : ici, la valeur de XF est fournie dans les données de la situation. En situation "réelle", commencer par un calcul avec XF = 1,0, puis en fonction du résultat obtenu pour F, modifier la valeur de XF jusqu'à obtenir F = 1,0. Cette remarque est valable également pour les exemples suivants.

C'est ce coefficient XF qui peut être comparé au coefficient de sécurité global F calculé selon Bishop par exemple (voir aussi la notice technique, partie C de ce manuel).

Conclusion pour le tutorial 1 : $XF_{rupture}$ = 1,09 et F_{Bishop} = 1,03.

4.1.2 Tutorial 2 avec calcul à la rupture

On effectuera ici la comparaison pour les 2 phases (calcul sans, puis avec pieux).

La situation "de référence" sera la première situation de chaque phase (calcul selon Clouterre / ouvrage courant / combinaison fondamentale, recherche manuelle).

- Après avoir rouvert le fichier tutorial2.prj, sélectionner la situation 1 de la première phase.
- Cliquer sur son libellé avec le bouton droit de la souris et sélectionner "Dupliquer".
- Modifier les propriétés de la nouvelle situation ainsi créée, conformément aux deux figures suivantes, pour effectuer un calcul suivant la méthode du calcul à la rupture.

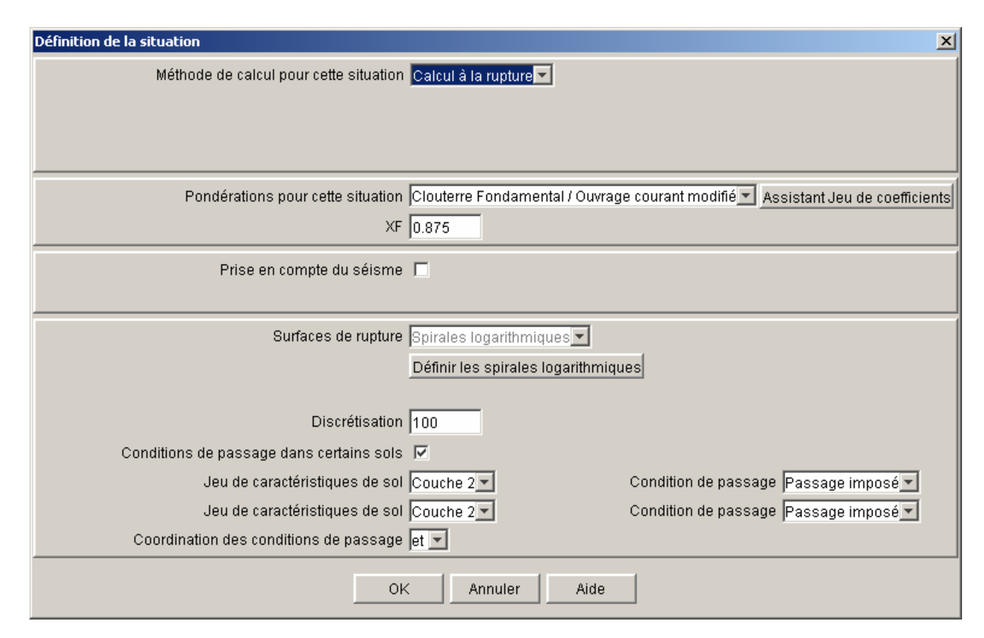


Figure 27 : Tutorial 2 / Paramètres de la situation 2 de la phase 1 (calcul à la rupture)

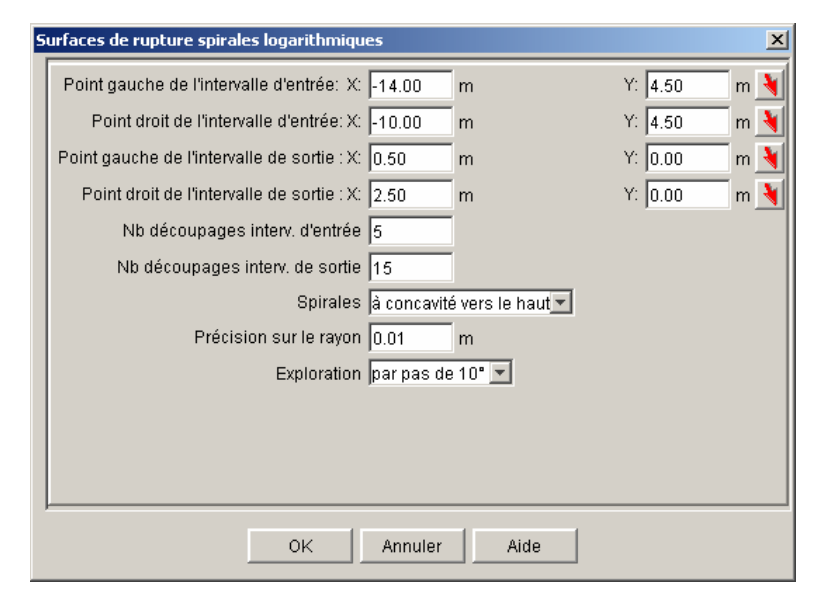


Figure 28 : Tutorial 2 / Paramètres de la situation 2 de la phase 1 (définition des spirales logarithmiques)

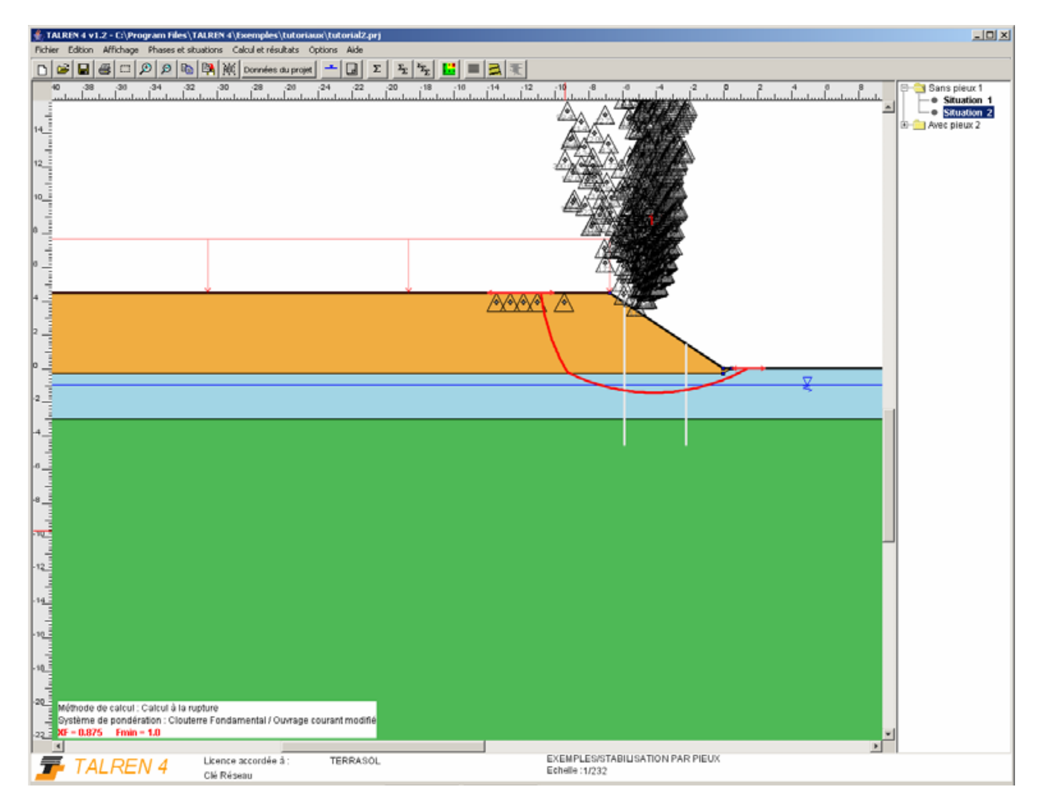


Figure 29 : Tutorial 2 / Calcul de la situation 2 de la phase 1
(calcul à la rupture, sans les pieux)

Conclusion pour le tutorial 2 / phase 1 : $XF_{rupture}$ = 0,875 et F_{Bishop} = 0,85.

Nous allons procéder de même pour la phase 2 (calcul avec les pieux).

- Sélectionner la situation 2 de la première phase.
- Cliquer sur son libellé avec le bouton droit de la souris et sélectionner "Copier".
- Sélectionner la situation 1 de la phase 2, et cliquer sur son libellé avec le bouton droit de la souris puis sélectionner "Coller".
- Modifier les propriétés de la nouvelle situation ainsi créée, conformément à la figure suivante.

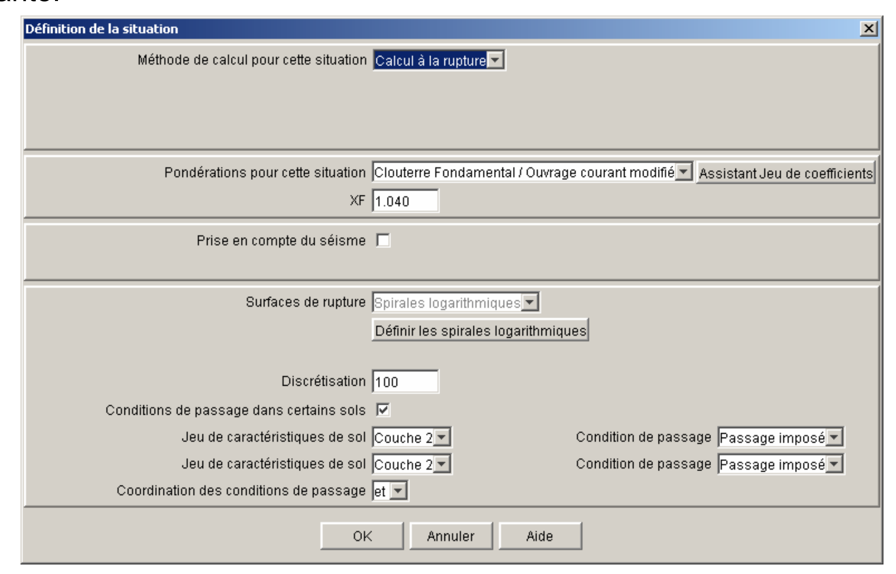


Figure 30 : Tutorial 2 / Paramètres de la situation 2 de la phase 2

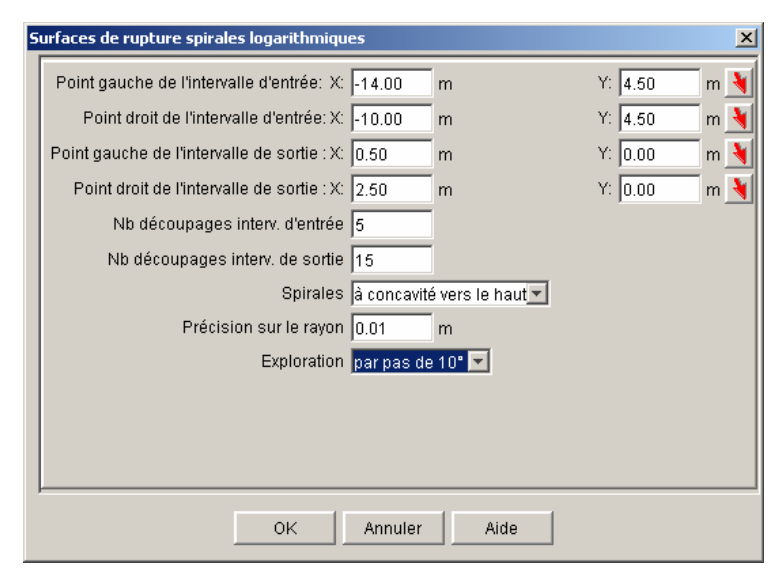


Figure 31 : Tutorial 2 / Paramètres de la situation 2 de la phase 2 (définition des spirales logarithmiques)

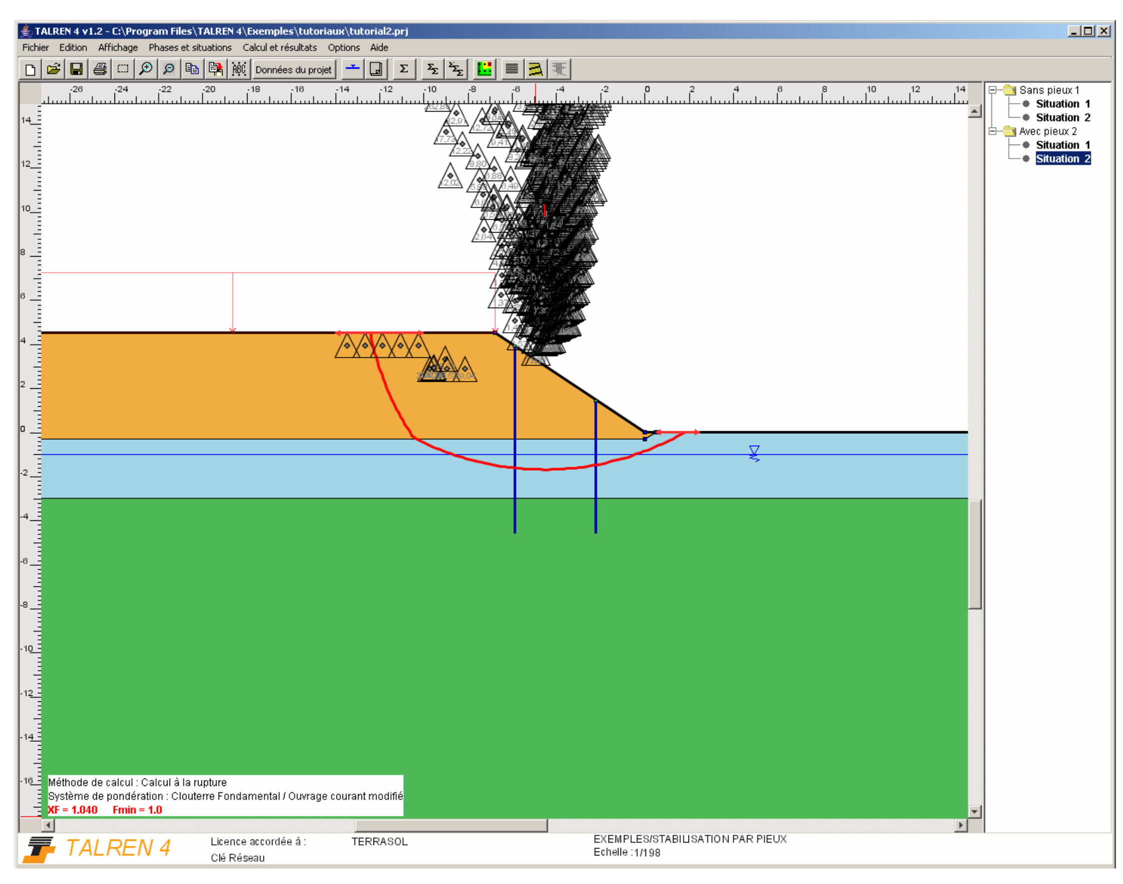


Figure 32 : Tutorial 2 / Calcul de la situation 2 de la phase 2 (calcul à la rupture, avec les pieux)

<u>Conclusion pour le tutorial 2 / phase 2</u> : $XF_{rupture}$ = 1,04 et F_{Bishop} = 1,00.

4.1.3 Tutorial 3 avec calcul à la rupture

On effectuera ici la comparaison pour chacune des 3 phases (différentes conditions hydrauliques).

La situation "de référence" sera la première situation de chaque phase.

- Après avoir rouvert le fichier tutorial3.prj, sélectionner la situation 1 de la première phase.
- Cliquer sur son libellé avec le bouton droit de la souris et sélectionner "Dupliquer".
- Modifier les propriétés de la nouvelle situation ainsi créée pour effectuer un calcul suivant la méthode du calcul à la rupture (paramètres sur les Figure 33 et Figure 34).
- Après avoir effectué le calcul, copier/coller cette situation dans les autres phases pour effectuer des calculs avec les différentes conditions hydrauliques définies dans chaque phase. Modifier les paramètres des spirales logarithmiques si nécessaire.

Les résultats pour les 3 phases sont donnés sur les figures suivantes, et synthétisés dans le Tableau 2.

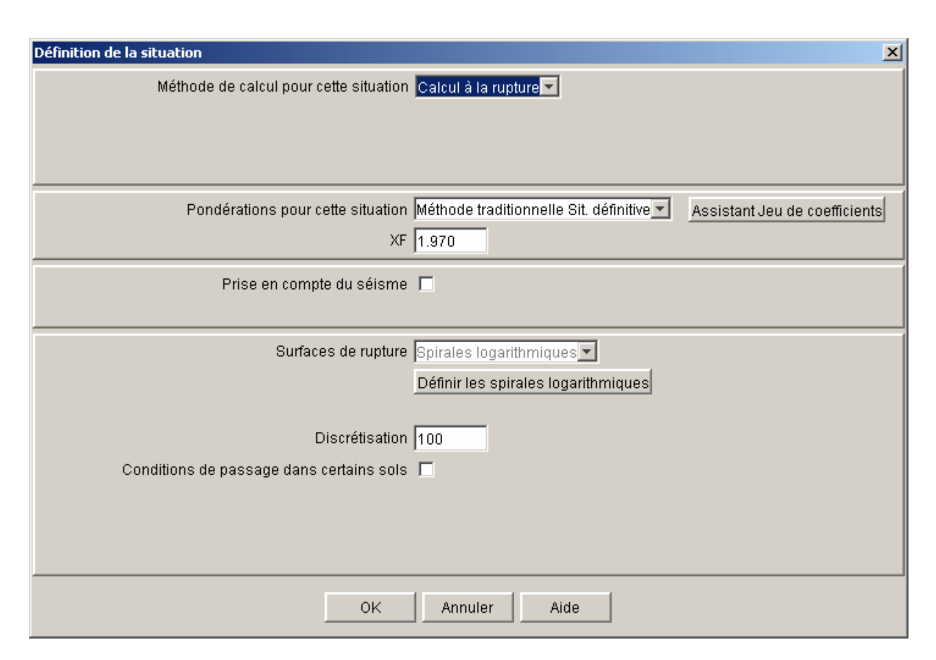


Figure 33 : Tutorial 3 / Paramètres de la situation 2 de la phase 1 (calcul à la rupture)

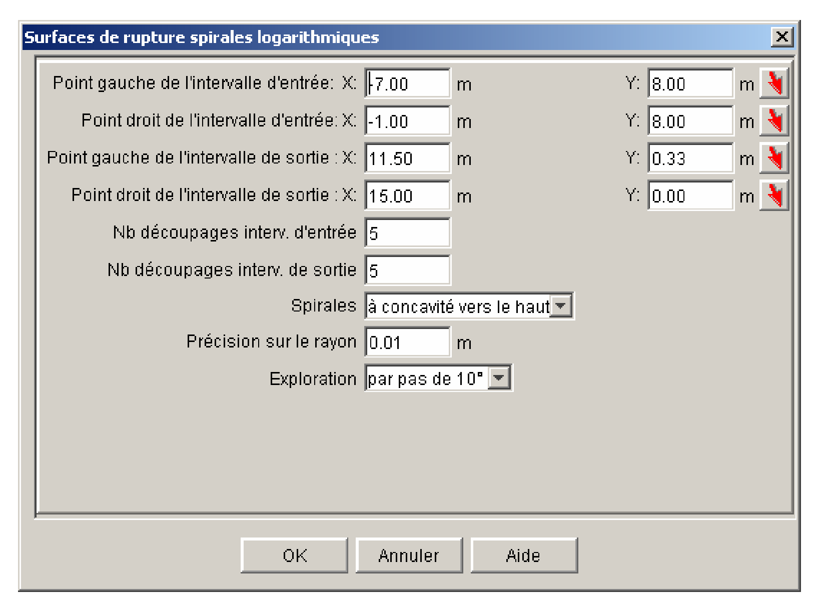


Figure 34 : Tutorial 3 / Paramètres de la situation 2 de la phase 1 (définition des spirales logarithmiques)

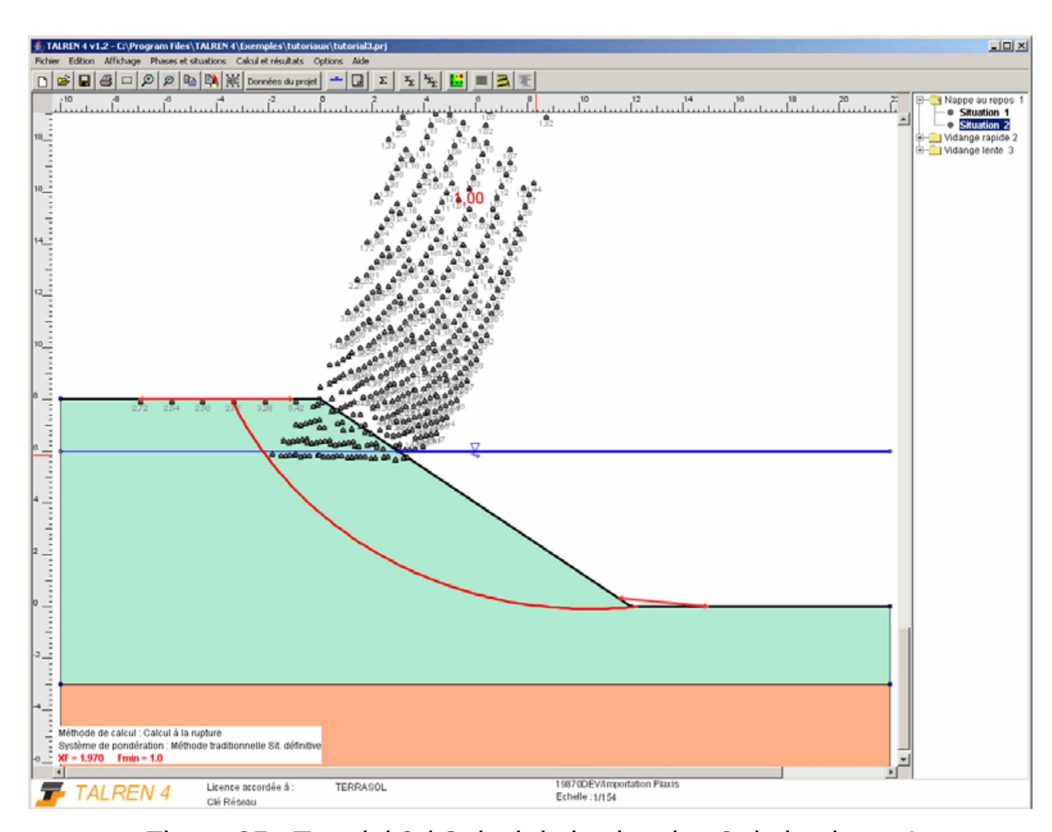


Figure 35 : Tutorial 3 / Calcul de la situation 2 de la phase 1 (calcul à la rupture, nappe permanente)

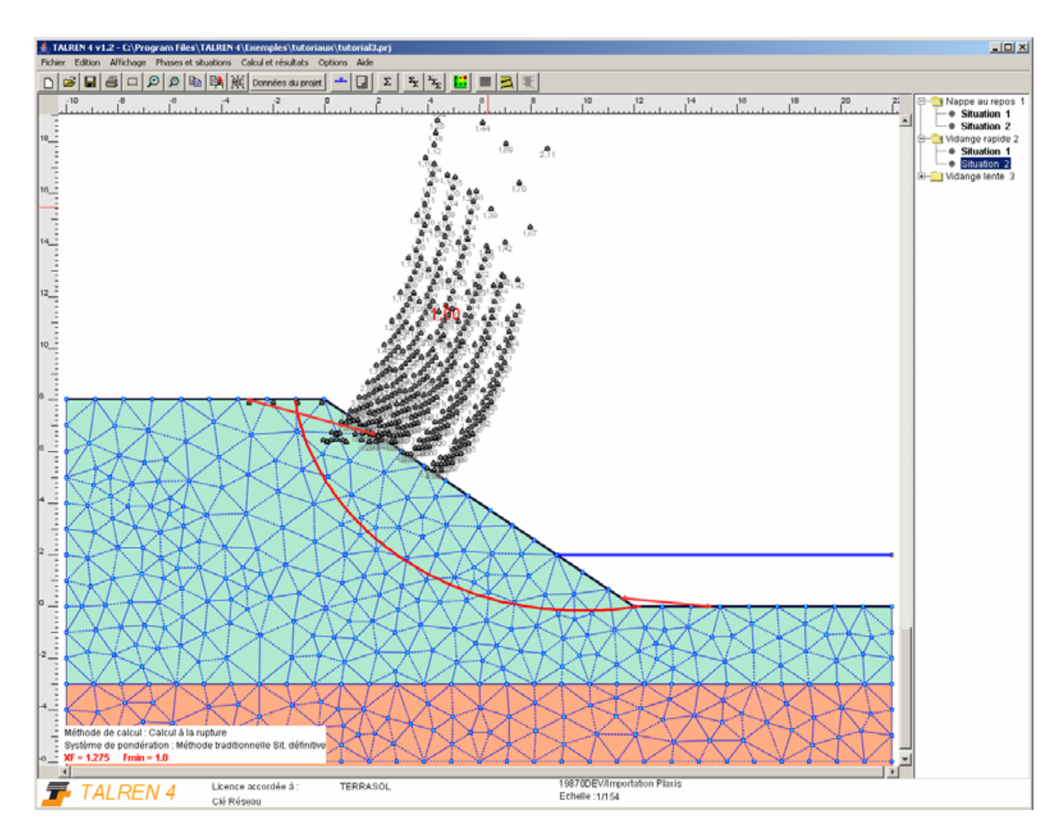


Figure 36 : Tutorial 3 / Calcul de la situation 2 de la phase 2
(calcul à la rupture, vidange rapide)

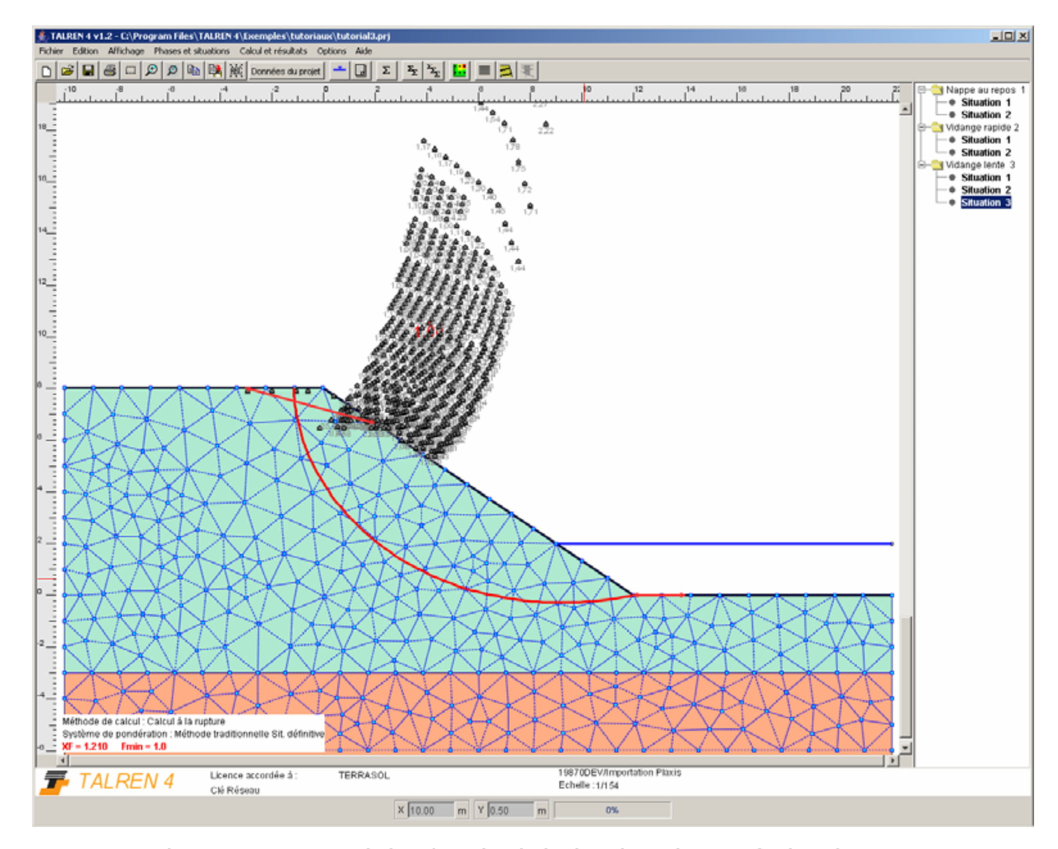


Figure 37 : Tutorial 3 / Calcul de la situation 3 de la phase 3
(calcul à la rupture, vidange lente)

Conclusion pour le tutorial :

Conditions hydrauliques	F_{Bishop}	$XF_{calcul\ à\ la\ rupture}$
Nappe permanente (phase 1)	F = 2,05	XF = 1,970
Vidange rapide (phase 2)	F = 1,27	XF = 1,275
Vidange lente (phase 3)	F = 1,14	XF = 1,210

Tableau 2 : synthèse des résultats du tutorial 3 : comparaison Bishop/calcul à la rupture

4.1.4 Remarques sur la comparaison calcul à la rupture / calcul Bishop

- Il est observé sur les 3 cas particuliers présentés que constituent les tutoriaux 1, 2 et 3 que le calcul à la rupture conduit à un coefficient de sécurité XF qui demeure proche de celui obtenu par la méthode traditionnelle de Bishop.
- L'écart est limité en pourcentage (quelques pourcents) et ne permet aucun classement systématique, le coefficient XF du calcul à la rupture étant tantôt supérieur, tantôt inférieur à celui de Bishop.
- Comme souligné dans la notice théorique (chapitre C de ce manuel), le calcul à la rupture détermine toujours et de manière rigoureuse une estimation par excès de la charge à la rupture réelle (et donc du coefficient de sécurité XF). A l'inverse, les hypothèses propres à la méthode de Bishop rendent indéterminée la position du résultat par rapport à la charge de rupture réelle.
- Les écarts observés sur les exemples traités s'accordent avec ces éléments.

4.2 Tutorial 6 : estimation des coefficients de poussée/butée par la méthode du calcul à la rupture

4.2.1 Etape 1 : présentation de l'étude

Cet exemple illustre l'application de la méthode du calcul à la rupture à l'étude de la poussée/butée des terres.

On étudiera la stabilité du talus vertical monocouche, pour différentes valeurs de l'obliquité des contraintes (δ).

Une première série de calculs sur le premier fichier défini concernera les calculs de poussée. Dans un 2ème temps, nous présenterons les calculs de butée, effectués dans un deuxième fichier.

Nota : dans cet exemple, on ne détaillera pas autant les manipulations que dans le tutorial 1 : pour davantage de détails, vous pouvez vous reporter soit à ce tutorial 1, soit à la partie B du manuel.

Le principe du calcul est le suivant :

Avec le calcul à la rupture, le résultat F = 1 traduit l'équilibre des forces exercées sur le système, selon une approche par l'extérieur (voir notice technique, partie C de ce manuel).

Si on considère la géométrie de la Figure 38 (talus vertical monocouche), la surcharge répartie triangulaire appliquée le long du parement vertical s'oppose à la poussée des terres.

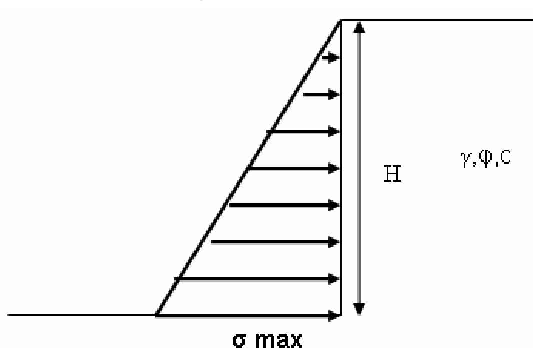


Figure 38 : schéma de calcul pour l'estimation de la poussée des terres (cas $\delta = 0$)

Pour F = 1 avec le calcul à la rupture, la résultante de la surcharge est égale à la résultante de la poussée des terres, et donc $\sigma_{\max} = K_a.\gamma.H$.

Le schéma de la figure correspond à une obliquité des contraintes δ = 0, mais on peut mener le même raisonnement pour des obliquités différentes (en inclinant la surcharge appliquée sur le parement).

D'autre part, on peut mener la même analyse sur le schéma "inversé" (Figure 39), pour raisonner sur la butée au lieu de la poussée;

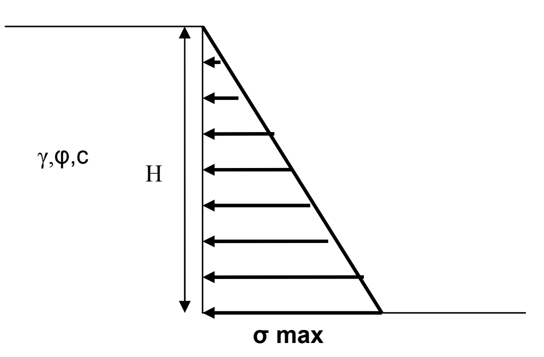


Figure 39 : schéma de calcul pour l'estimation de la butée des terres (cas $\delta = 0$)

Pour démarrer ce projet dans TALREN :

- Lancer TALREN en utilisant le menu [Démarrer] de Windows ou en cliquant sur l'icône située sur le bureau Windows ;
- Sélectionner le menu [Fichier] puis l'option [Nouveau] ou cliquer sur l'icône de la barre de boutons.
- Cliquer sur le bouton ou sélectionner le menu [Données] puis [Description générale], et compléter la boîte de dialogue comme indiqué sur la figure suivante.

  La méthode de calcul par défaut sera pour ce projet le calcul à la rupture.

  Les pondérations utilisées par défaut sont celles définies sur la Figure 41 (tous les coefficients partiels sont définis égaux à 1).

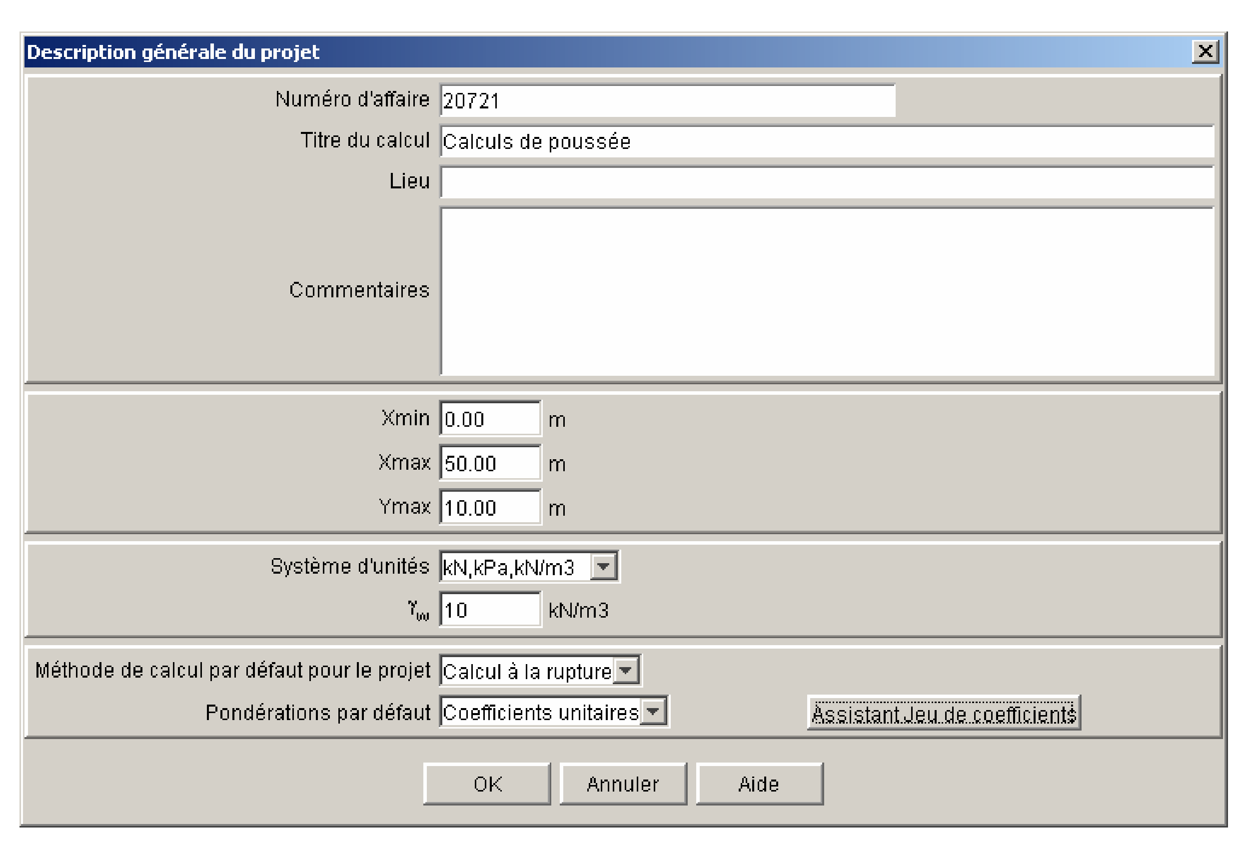


Figure 40 : description générale

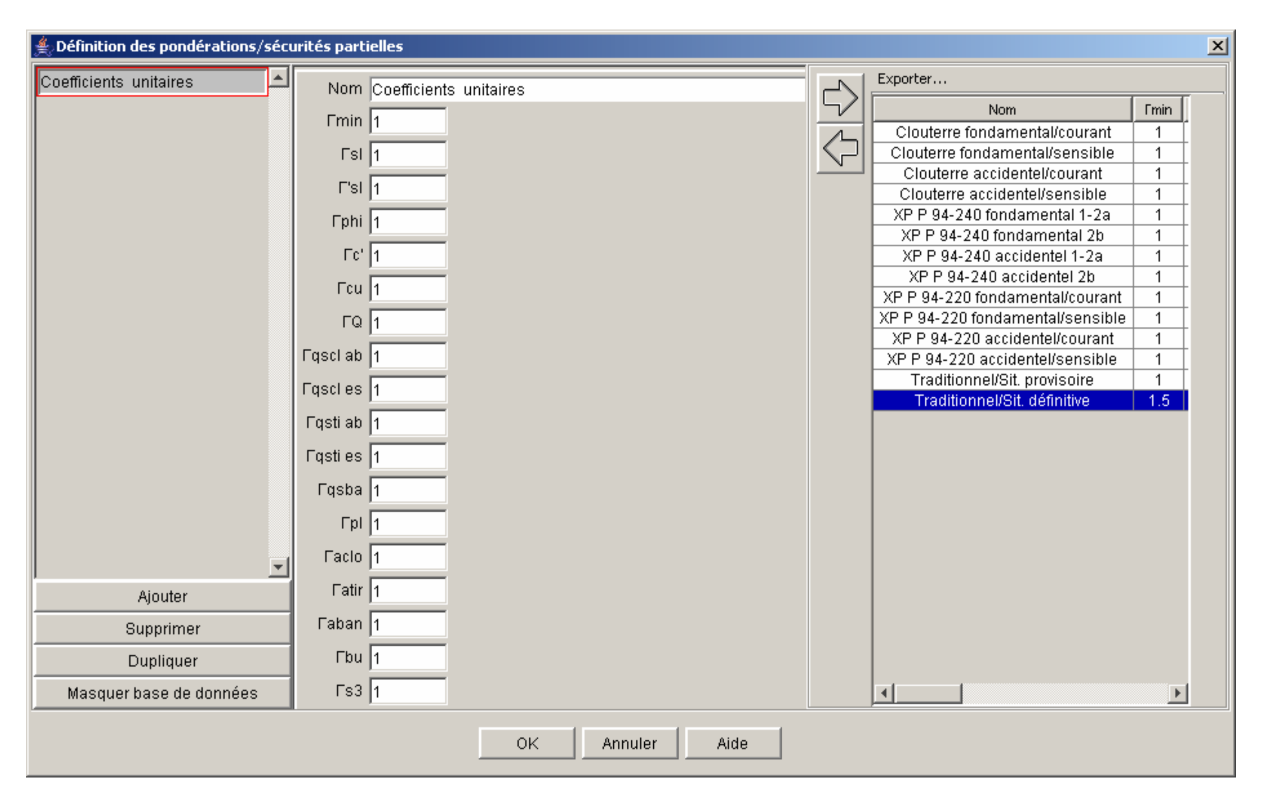


Figure 41 : pondérations par défaut

4.2.2 Etape 2 : définition de la géométrie

Les limites du modèle et les coordonnées des points de la géométrie sont conformes au tableau et à la figure ci-dessous.

- Pour représenter cette géométrie dans TALREN 4, utiliser l'une des 3 méthodes suivantes : dessin à la souris, saisie des coordonnées directement dans l'écran principal, ou utilisation de la boîte de dialogue de définition de la géométrie.

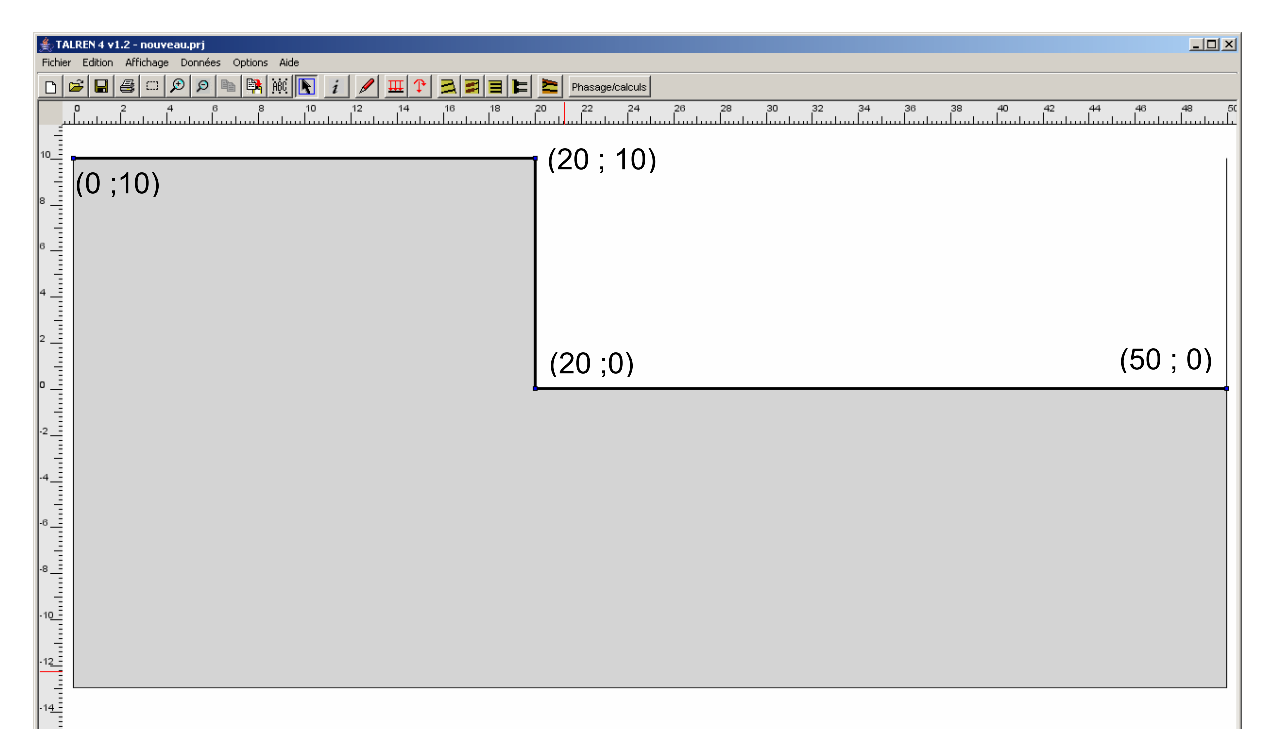


Figure 42 : géométrie du modèle

4.2.3 Etape 3 : définition des surcharges

Il s'agit de définir la surcharge répartie permettant de modéliser la poussée des terres. Nous allons étudier 3 hypothèses pour la valeur de l'obliquité des contraintes : 0, $\frac{2}{3}\varphi$ et φ (soit respectivement 0°, 20° et 30° dans le cas de notre monocouche d'angle de frottement égal à 30°).

Les tables de Kerisel et Absi donnent pour ces 3 cas les valeurs suivantes de K_a, d'où on peut déduire les valeurs de surcharge à appliquer (comme indiqué dans l'introduction à cet exemple, avec φ = 30 ° et γ = 20 kN/m^3) :

- $\delta = 0$ K_a = 0,333 σ_{max} = 66,6 kPa
- $\delta = \frac{2}{3}\varphi$ K_a = 0,300 σ_{max} = 60,0 kPa
- $\delta = \varphi$ K_a = 0,308 σ_{max} = 61,6 kPa

Pour définir ces 3 surcharges dans TALREN 4, utiliser l'une des 3 méthodes décrites dans le tutorial 1 et dans la partie B de ce manuel.

Les caractéristiques des surcharges sont définies dans le tableau ci-dessous :

- les surcharges doivent être définies en suivant le sens de parcours du talus de la gauche vers la droite (voir aussi le paragraphe 4.4.2.1 du chapitre B de ce manuel).
- les angles négatifs ne sont pas possibles (d'où des angles 160 / 150°, avec des valeurs de surcharges négatives).

Nom	X gauche (m)	Y gauche (m)	q gauche (kPa)	X droite (m)	Y droite (m)	q droite (kPa)	Ang /horizontale (°)
Sr 1	20	10	0	20	0	66,6	0
Sr 2	20	10	0	20	0	-60,0	160
Sr 3	20	10	0	20	0	-61,6	150

Tableau 3 : caractéristiques des surcharges (modélisant la force s'opposant à la poussée)

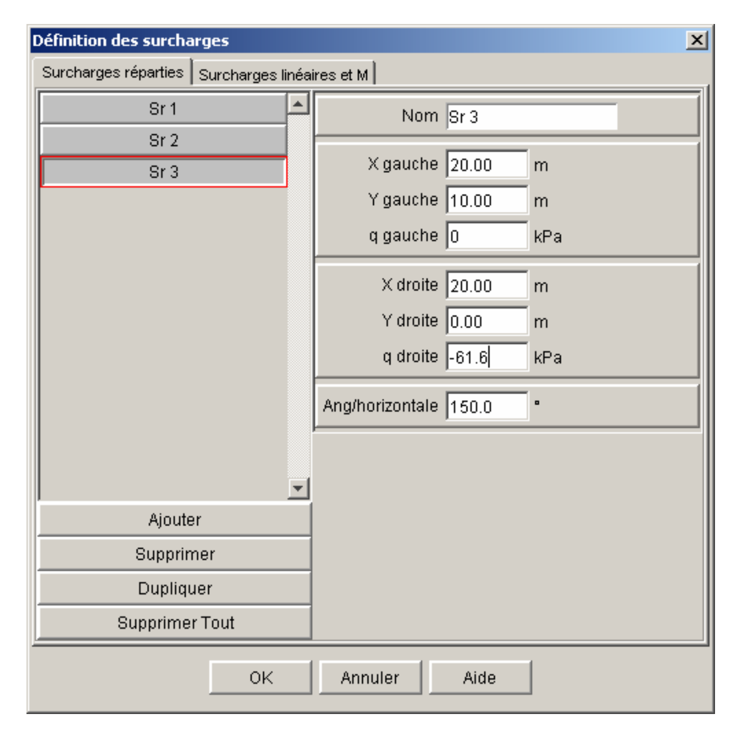


Figure 43 : exemple de caractéristiques pour la surcharge 3 (Sr 3)

4.2.4 Etape 4 : définition des caractéristiques de sol

Une seule couche de sol est à définir :

Couche	γ (kN/m^3)	φ' (°)	c' (kPa)
Couche 1	20.0	30	0.0

Tableau 4 : caractéristiques des sols

- Pour définir ces caractéristiques, sélectionner par exemple le menu [Données] puis [Caractéristiques des sols]. Cliquer sur le bouton [Ajouter], puis compléter les données pour la couche.

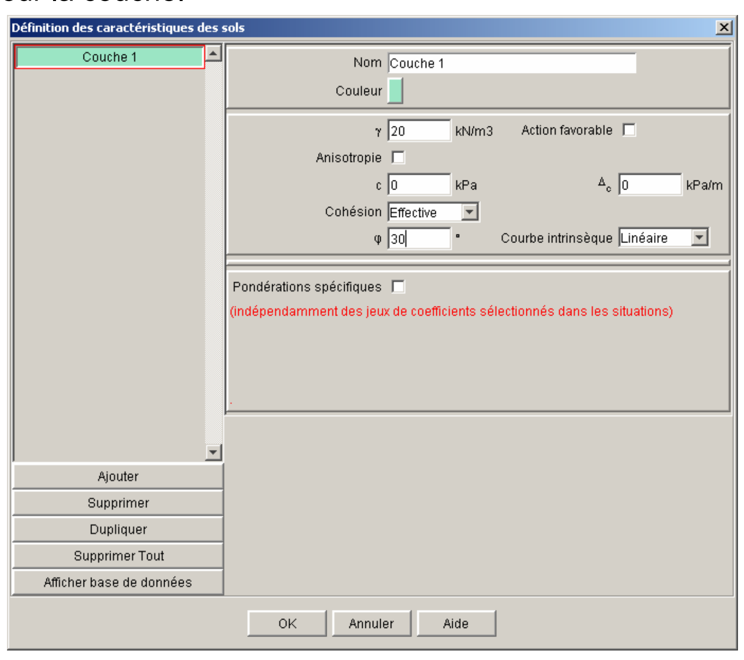


Figure 44 : caractéristiques pour la couche 1

- Pour attribuer ces caractéristiques à la zone de sol définie, procéder par exemple par drag&drop depuis la liste à gauche de la boîte de dialogue des sols.

Le modèle tel que défini à ce stade doit être conforme à la Figure 45.

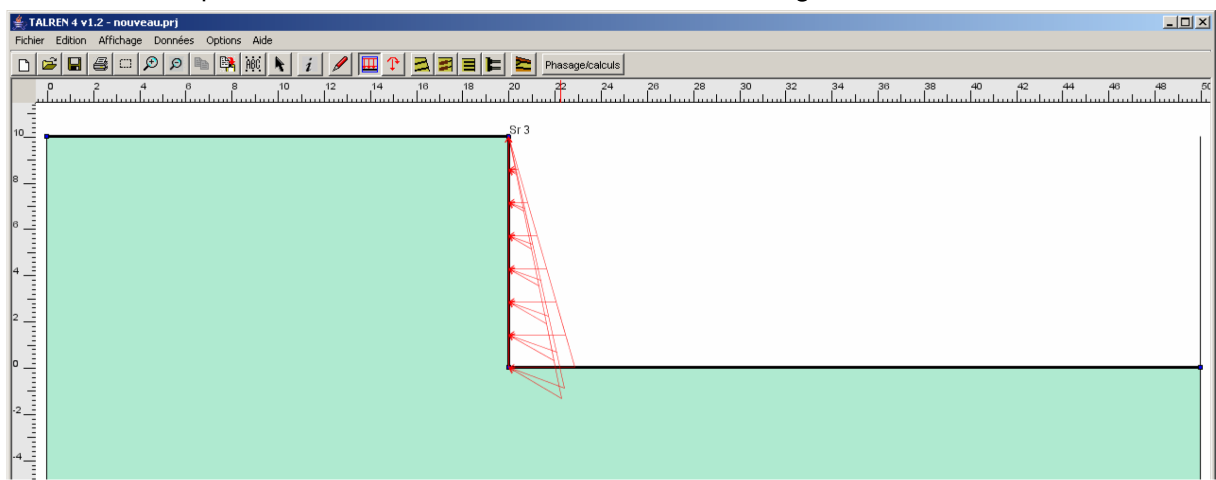


Figure 45 : modèle après définition des données

4.2.5 Etape 5 : définition de la phase 1

Le projet comportera 3 phases : une seule géométrie est étudiée, mais 3 surcharges différentes doivent être prises en compte individuellement.

- Passer en mode phasage, grâce au menu [Données] ou au bouton.
- Enregistrer le projet comme cela est proposé automatiquement.
- La première phase a été créée automatiquement.

Elle ne nécessite pas de manipulation particulière (pas de modification de géométrie par rapport à la géométrie définie en mode données, pas de conditions hydrauliques, etc), sauf l'activation de la surcharge Sr 1 (correspondant à l'hypothèse $\delta = 0$) : pour activer cette surcharge, cliquer dessus avec le bouton gauche de la souris.

Il ne reste plus ensuite qu'à définir les propriétés de la situation 1 pour cette phase 1.

4.2.5.1 Définition de la situation 1

La première situation a été créée automatiquement. Il convient néanmoins de définir ses propriétés, et notamment : pondérations partielles et surfaces de rupture.

Pour accéder aux propriétés de la situation, choisir le menu [Phases et Situations], option [Définition de la situation sélectionnée], ou cliquer avec le bouton droit de la souris sur le libellé de la situation, et choisir l'option [Définition de la situation sélectionnée]. Compléter la boîte de dialogue qui apparaît selon les indications suivantes (Figure 46 et Figure 47) :

- Méthode de calcul : calcul à la rupture (option choisie par défaut dans la description générale)
- Pondérations partielles : coefficients unitaires (option choisie par défaut dans la description générale). On conserve ici la valeur par défaut proposée pour le coefficient XF (pas de pondération additionnelle appliquée sur c et tanφ).
- Sismique : nous n'allons pas définir de conditions sismiques pour cette situation.
- Définition des surfaces de rupture : nous allons choisir par exemple des spirales logarithmiques (ce choix est "forcé" lorsque la méthode du calcul à la rupture a été

sélectionnée). Les données correspondantes apparaissent sur les Figure 46 et Figure 47 (on accède à l'écran de la Figure 47 après avoir sélectionné "Spirales logarithmiques", puis cliqué sur le bouton "Définir les spirales logarithmiques").

Les spirales recherchées sont à concavité vers le haut, et passent en pied de talus. L'intervalle de sortie est donc composé d'un seul point de coordonnées (20;0), avec un nombre de découpages de 0. Par contre, un balayage est proposé pour l'intervalle d'entrée des spirales. Enfin, les valeurs proposées par défaut sont conservées pour la précision sur le rayon et le pas d'exploration sur l'angle au centre.

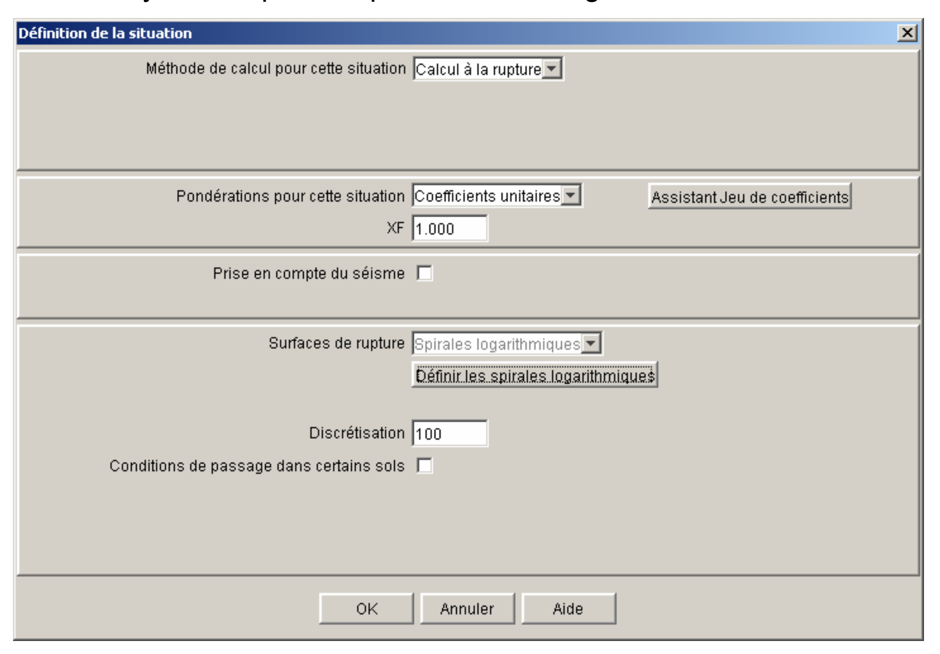


Figure 46 : définition de la 1ère situation de la 1ère phase

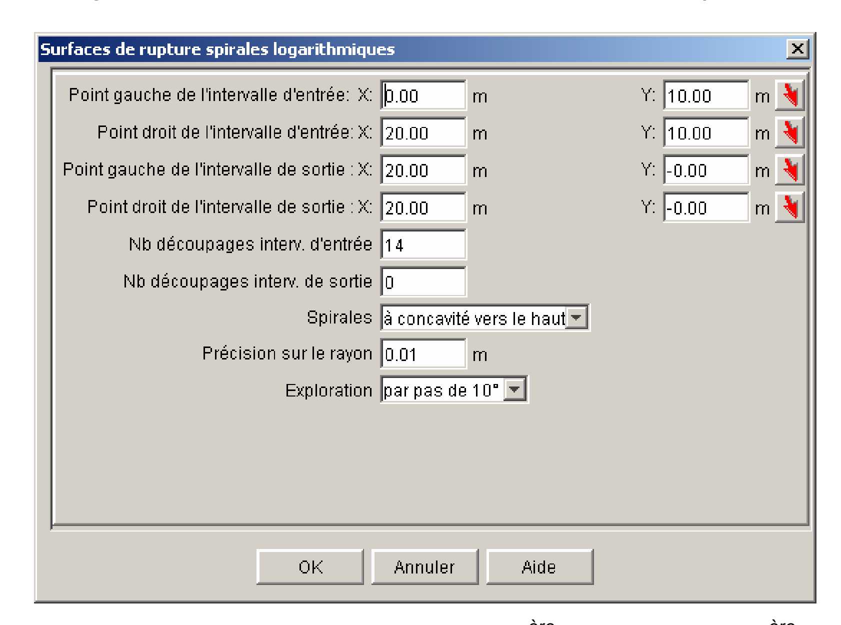


Figure 47 : définition des spirales pour la 1ère situation de la 1ère phase

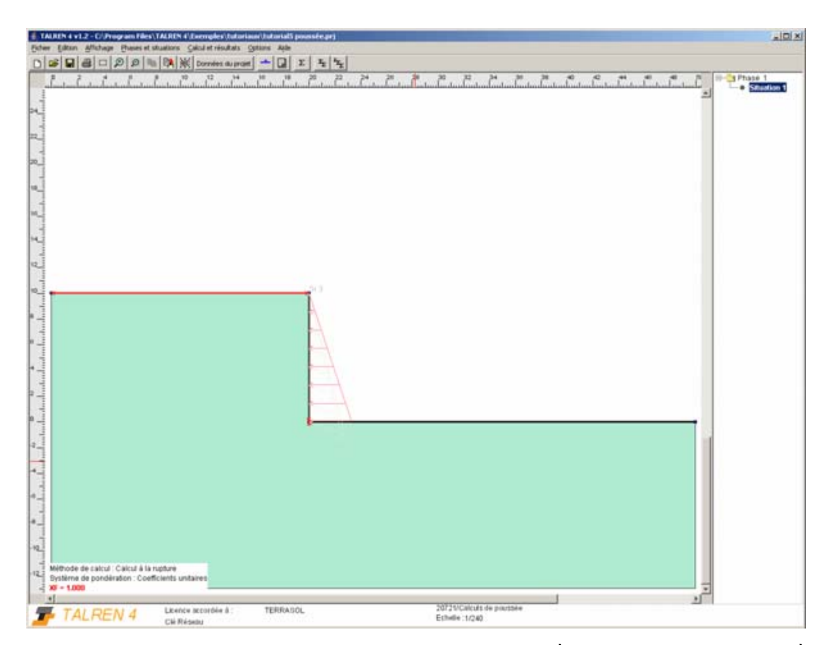


Figure 48 : copie d'écran après définition de la 1ère situation de la 1ère phase

Calcul et résultats pour la situation 1

- Pour effectuer le calcul de cette situation, choisir le menu [Calculs] puis l'option [Calculer la situation courante] ou cliquer sur le bouton Σ de la barre de boutons. Le calcul s'effectue puis le résultat s'affiche (Figure 49) : la spirale dessinée par défaut est celle qui correspond à la valeur minimum trouvée pour le coefficient de sécurité.

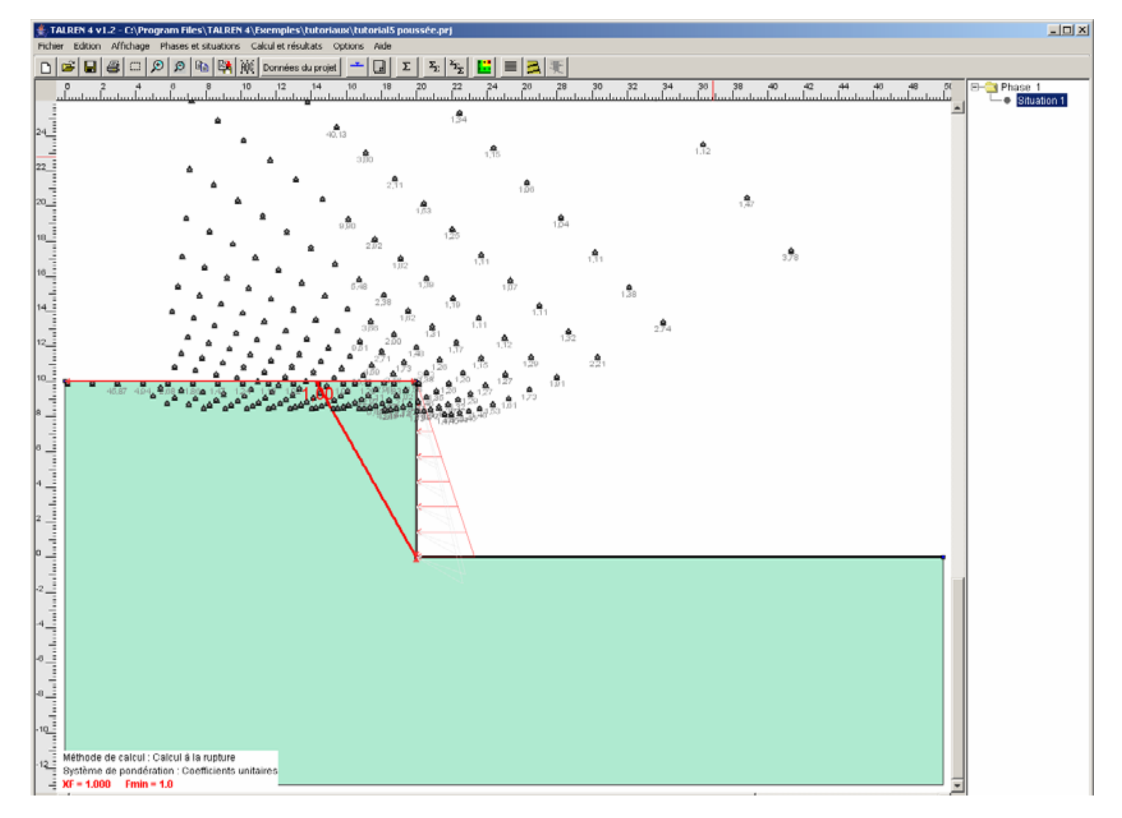


Figure 49 : résultat pour la situation 1 de la phase 1 (poussée, $\delta = 0$)

Le résultat est bien F = 1,00, ce qui signifie que la valeur du coefficient de poussée calculé avec Talren est bien égale à celle des tables de Kérisel et Absi (K_a = 0,333 pour δ = 0).

4.2.6 Etape 6 : définition de la phase 2

Il s'agit cette fois de vérifier le coefficient de poussée pour $\delta = \frac{2}{3}\varphi$: nous allons donc créer une nouvelle phase, désactiver la surcharge Sr 1 et activer la surcharge Sr 2.

- Sélectionner le menu [Phases et situations] puis cliquer sur [Ajouter une phase], ou cliquer avec le bouton droit de la souris sur la phase 1, puis sélectionner [Ajouter une phase]. Par défaut, la phase ajoutée reprend la configuration de la phase précédente (c'est-à-dire notamment la nappe phréatique définie).
- Cliquer sur la surcharge Sr 1 pour la désactiver.
- Cliquer sur la surcharge Sr 2 pour l'activer.
- La définition de la phase 2 est terminée.

Nous allons effectuer le même type de calcul que dans la phase 1.

Plutôt que de redéfinir la situation, nous allons copier/coller la situation définie pour la phase 1.

- Cliquer sur la situation 1 de la phase 1, puis cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Copier la situation] du menu contextuel.
- Cliquer sur la phase 2, puis cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Coller la situation] du menu contextuel.
- Cliquer ensuite sur la situation 1 (celle qui est restée "vide") de la phase 2 pour la supprimer (il n'est pas possible de la supprimer d'abord, car il est impossible de supprimer une situation unique dans une phase).

Il est ensuite possible d'effectuer le calcul pour la situation 1 de la phase 2.

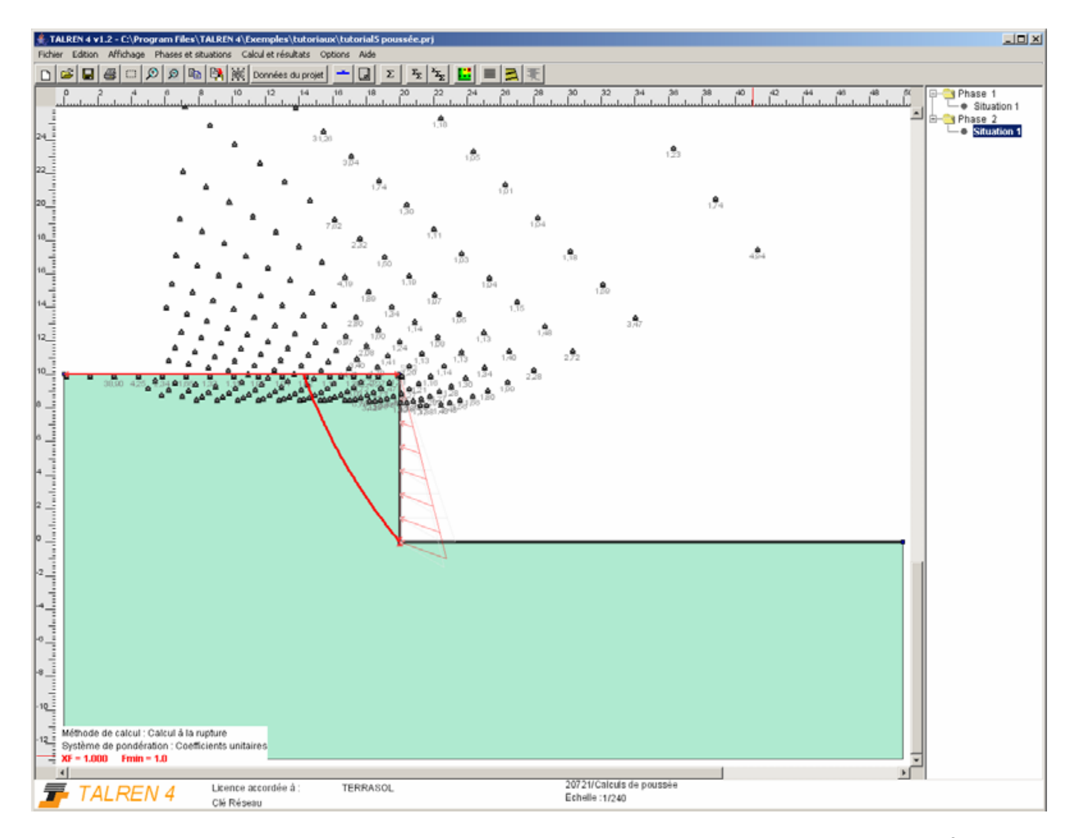


Figure 50 : résultat pour la situation 1 de la phase 2 (poussée, $\delta = \frac{2}{3}\varphi$)

Le résultat est bien F = 1,00, ce qui signifie là aussi que la valeur du coefficient de poussée calculé avec Talren est bien égale à celle des tables de Kérisel et Absi (K_a = 0,300 pour $\delta = \frac{2}{3}\varphi$).

4.2.7 Etape 7 : définition de la phase 3

Il s'agit cette fois de vérifier le coefficient de poussée pour $\delta = \varphi$: nous allons donc créer une nouvelle phase, désactiver la surcharge Sr 2 et activer la surcharge Sr 3.

- Sélectionner le menu [Phases et situations] puis cliquer sur [Ajouter une phase], ou cliquer avec le bouton droit de la souris sur la phase 2, puis sélectionner [Ajouter une phase]. Par défaut, la phase ajoutée reprend la configuration de la phase précédente (c'est-à-dire notamment la nappe phréatique définie).
- Cliquer sur la surcharge Sr 2 pour la désactiver.
- Cliquer sur la surcharge Sr 3 pour l'activer.
- La définition de la phase 3 est terminée.

Nous allons effectuer le même type de calcul que dans la phase 1.

Plutôt que de redéfinir la situation, nous allons copier/coller la situation définie pour la phase 1 (ou pour la phase 2).

- Cliquer sur la situation 1 de la phase 1 (ou de la phase 2).
- Cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Copier la situation] du menu contextuel.
- Cliquer sur la phase 3.
- Cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Coller la situation] du menu contextuel.
- Cliquer ensuite sur la situation 1 (celle qui est restée "vide") de la phase 3 pour la supprimer (il n'est pas possible de la supprimer d'abord, car il est impossible de supprimer une situation unique dans une phase).

Il est ensuite possible d'effectuer le calcul pour la situation 1 de la phase 3.

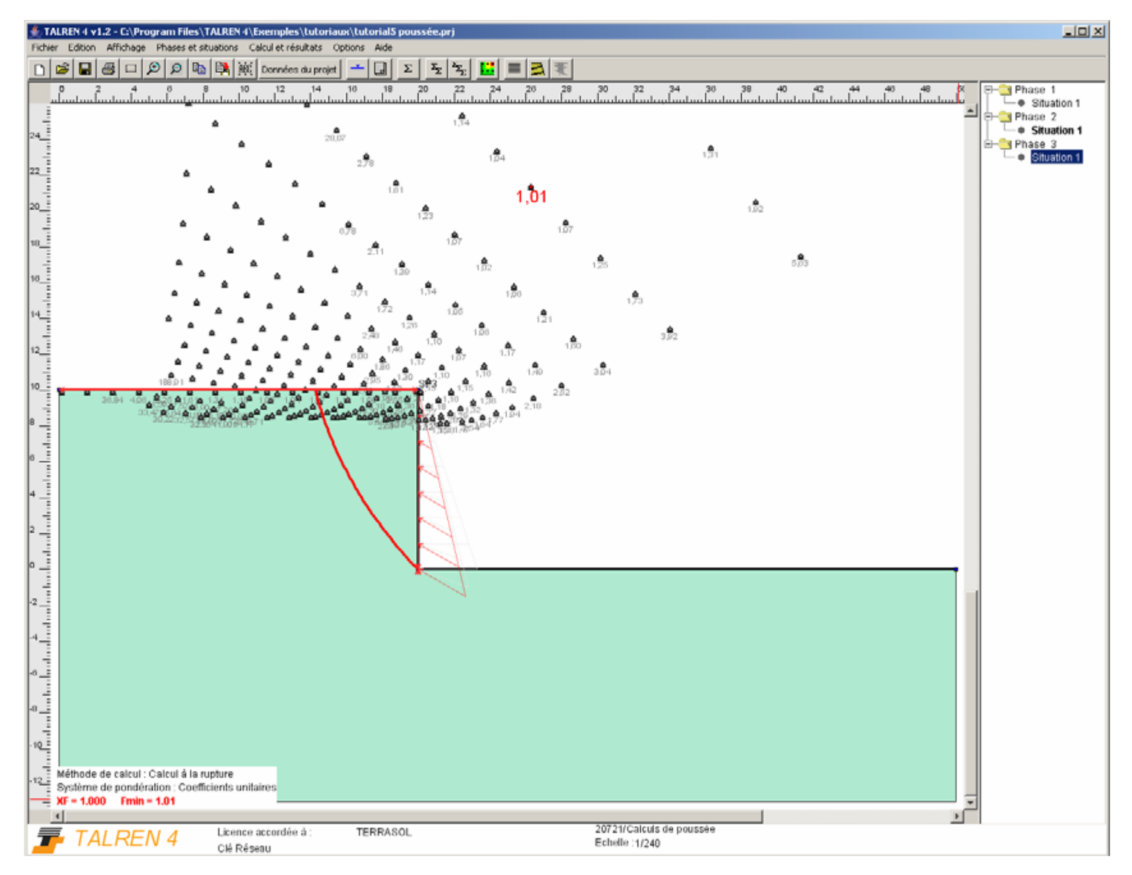


Figure 51 : résultat pour la situation 1 de la phase 3 (poussée, $\delta = \varphi$)

Le résultat est F = 1,01, ce qui signifie que la valeur du coefficient de poussée calculé avec Talren est différente de celle des tables de Kérisel et Absi (K_a = 0,308 pour $\delta = \varphi$).

On peut dans ce cas poursuivre le calcul par un calage de l'intensité de la surcharge permettant d'obtenir F = 1 :

- Repasser en mode [Données du projet].
- Sélectionner le menu Données, puis l'option Surcharges.
- Sélectionner la surcharge Sr 3, et modifier la valeur de q droite : -61,0 kPa au lieu de -61,6 kPa, et valider.
- Repasser en modes [Phasage/Calculs], et sélectionner la situation 1 de la phase 3.
- Relancer le calcul pour cette situation (la modification de surcharge Sr 3 sera prise en compte).

Le résultat est cette fois F = 1,00 (Figure 52), ce qui signifie que la valeur du coefficient de poussée calculé avec Talren est $K_{a\ talren}$ = 0,305 (au lieu de K_a = 0,308 lue dans les tables de Kérisel et Absi pour $\delta = \varphi$).

Dans le cas d'un équilibre de poussée, l'évaluation de la charge de rupture par excès (approche par l'extérieur avec le calcul à la rupture) implique une sous-estimation du coefficient K_a, ce qui est conforme au résultat obtenu : $K_{a\ \text{calcul à la rupture}} < K_{a\ \text{théorique}}$.

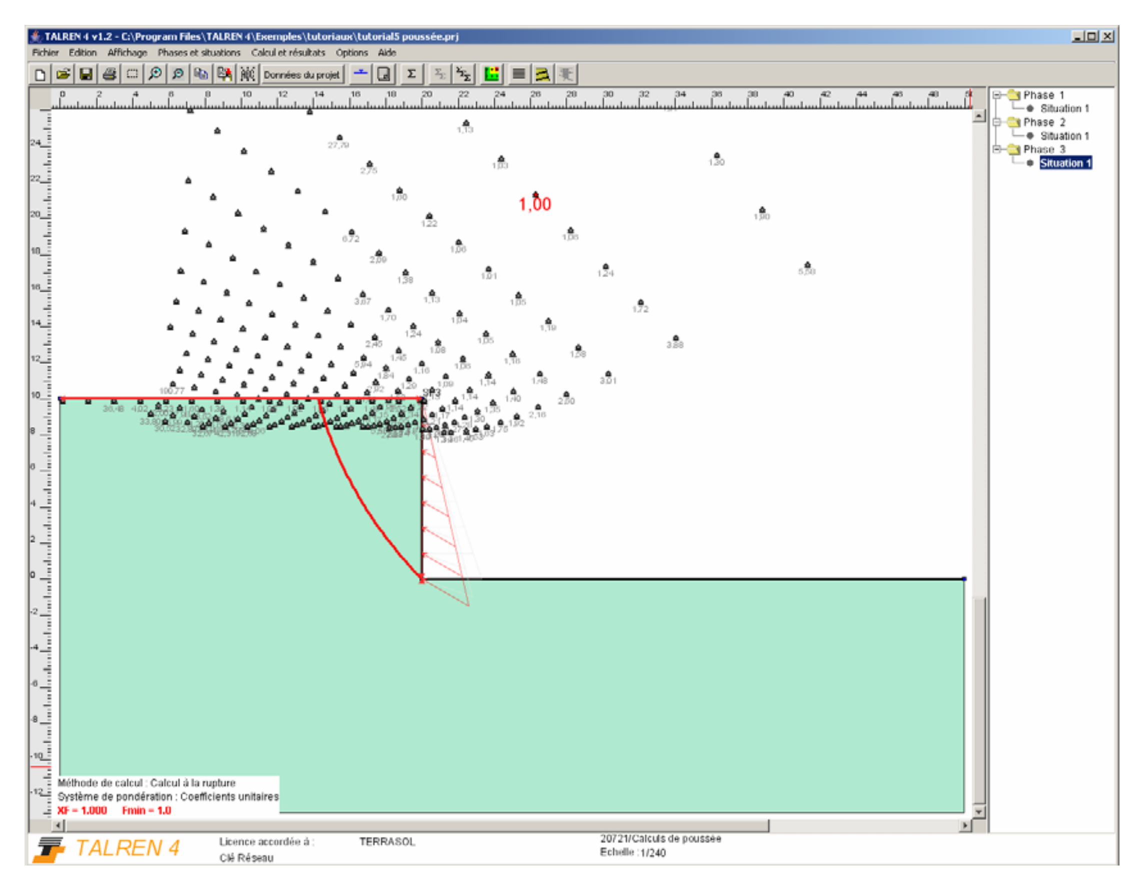


Figure 52 : résultat pour la situation 1 de la phase 3 (poussée, $\delta = \varphi$), avec σ_{max} = 61,0 kPa

4.2.8 Etape 8 : estimation du coefficient de butée des terres

Il s'agit cette fois d'estimer le coefficient de butée, de façon tout-à-fait analogue à ce qui a été fait précédemment pour la poussée, mais sur une coupe "inversée" (Figure 39).

Nous allons réutiliser les données définies précédemment.

- Passer en mode [Données].
- Sélectionner le menu [Options] puis l'option [Retournement de la coupe].
- Choisir de retourner la coupe dans un nouveau projet, et enregistrer ce nouveau projet sous un nouveau nom (butee.prj par exemple).

Il faut ensuite modifier les valeurs des surcharges : elles vont cette fois s'opposer aux forces de butée. 3 valeurs de l'obliquité δ vont à nouveau être considérées et les valeurs correspondantes de K_p suivantes sont lues dans les tables de Kérisel et Absi, d'où on peut déduire les valeurs de surcharge à appliquer (comme indiqué dans l'introduction à cet exemple, avec φ = 30 ° et γ = 20 kN/m^3):

- $\delta = 0$ — K_p = 3,000 — σ_{max} = 600 kPa
- $\delta = -\frac{2}{3}\varphi$ — K_p = 5,300 — σ_{max} = 1060 kPa
- $\delta = -\varphi$ — K_p = 6,500 — σ_{max} = 1300 kPa



Les caractéristiques des surcharges sont définies dans le tableau ci-dessous.

Attention, il est très important de les définir en suivant à nouveau le talus de la gauche vers la droite du modèle, donc en l'occurrence de bas en haut (voir aussi le paragraphe 4.4.2.1 du chapitre B de ce manuel).

Nom	X gauche (m)	Y gauche (m)	q gauche (kPa)	X droite (m)	Y droite (m)	q droite (kPa)	Ang /horizontale (°)
Sr 1	-20	0	-600	-20	10	0	0
Sr 2	-20	0	1060	-20	10	0	160
Sr 3	-20	0	1300	-20	10	0	150

Tableau 5 : caractéristiques des surcharges (modélisant la force s'opposant à la butée)

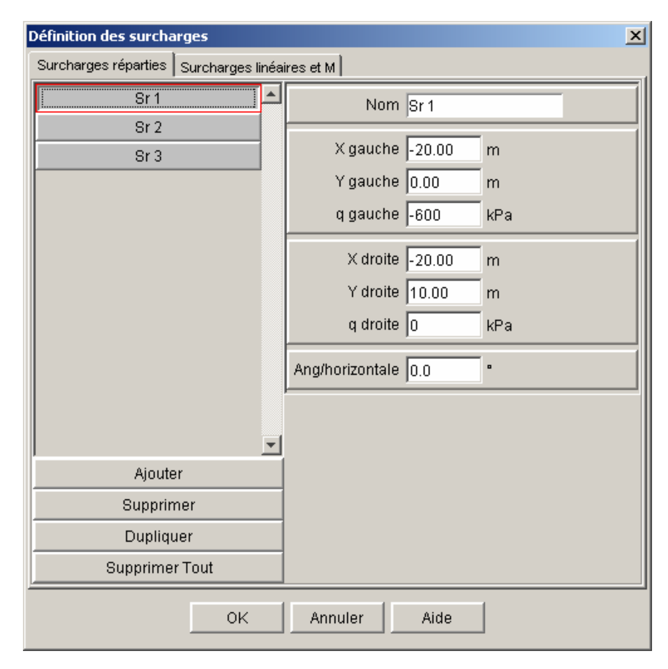


Figure 53 : exemple de caractéristiques pour la surcharge 1 (Sr 1)

Les autres données du projet sont inchangées par rapport au fichier précédent pour le calcul de poussée.

Toutefois, nous allons étendre le modèle à droite (les ruptures en butée sont susceptibles de concerner une zone de sol plus importante à l'amont).

Pour cela, choisir le menu [Données] puis l'option [Description générale], et définir X_{max} = 20 m (au lieu de X_{max} = 0 suite au retournement de la coupe). Puis valider : le modèle sera alors automatiquement étendu jusqu'en X = 20 m.

Il convient à présent de passer en mode phasage.

La définition des 3 phases est toujours correcte, de même que celle de chaque situation, excepté la définition des intervalles d'entrée et de sortie pour les spirales (et le nombre de découpages), qu'il convient de modifier pour la situation 1 de chaque phase conformément à la Figure 54.

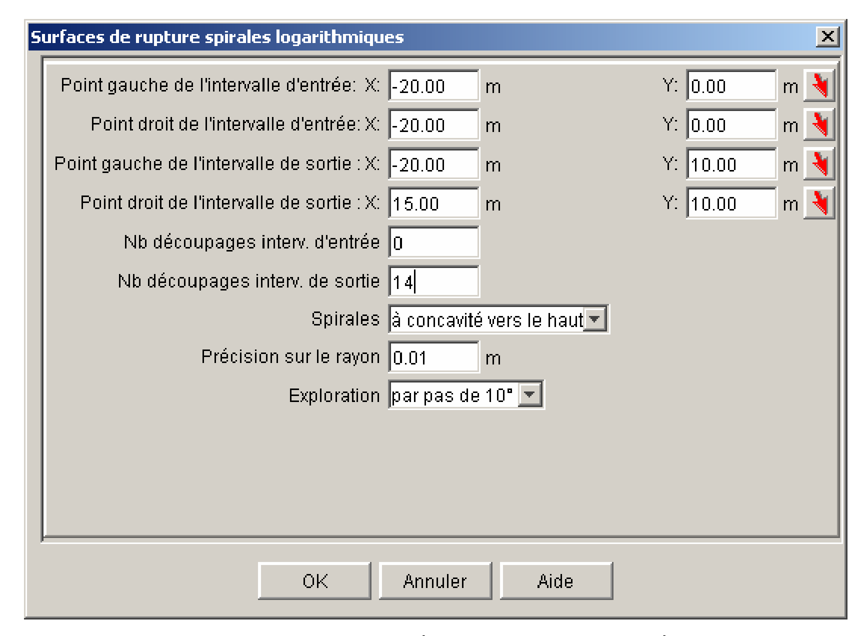


Figure 54 : définition des spirales pour la 1ère situation de la 1ère phase (calculs de butée)

Il suffit ensuite de relancer les 3 calculs, avec par exemple le bouton qui permet de lancer avec un seul clic l'ensemble des calculs.

Les résultats sont donnés ci-dessous : copies d'écran des résultats obtenus avec les surcharges précédemment définies et tableau récapitulatif des coefficients de butée des terres obtenus après correction éventuelle de l'intensité des surcharges pour obtenir F = 1.

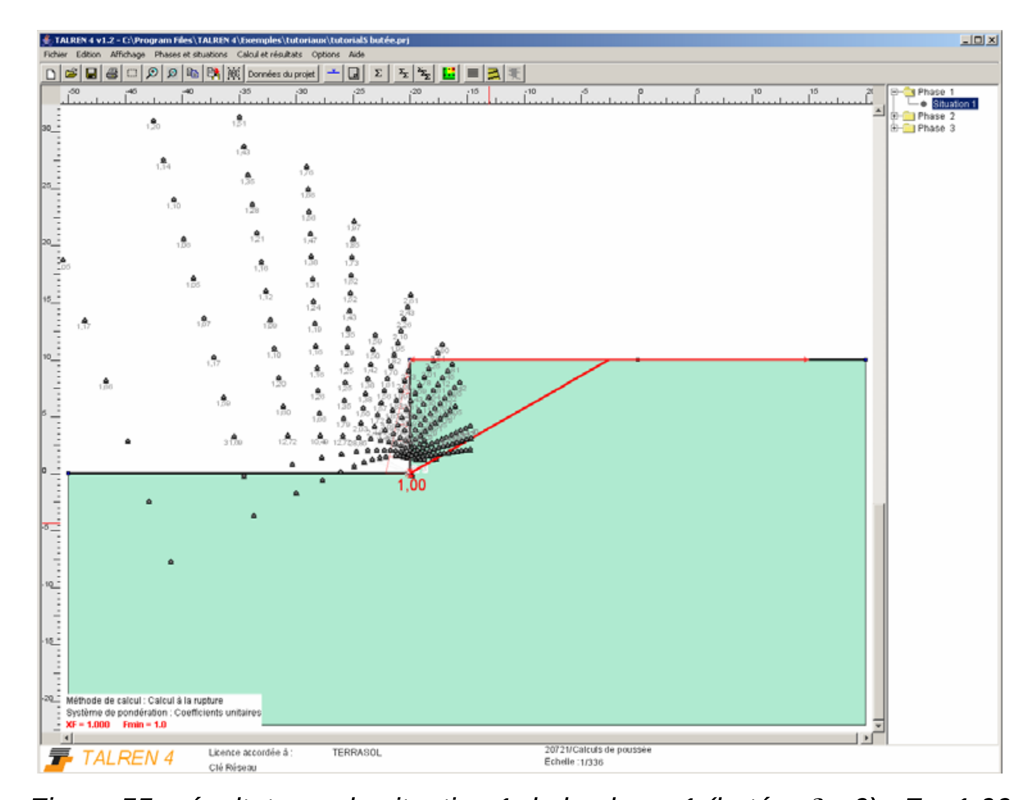


Figure 55 : résultat pour la situation 1 de la phase 1 (butée, $\delta = 0$) : F = 1,00



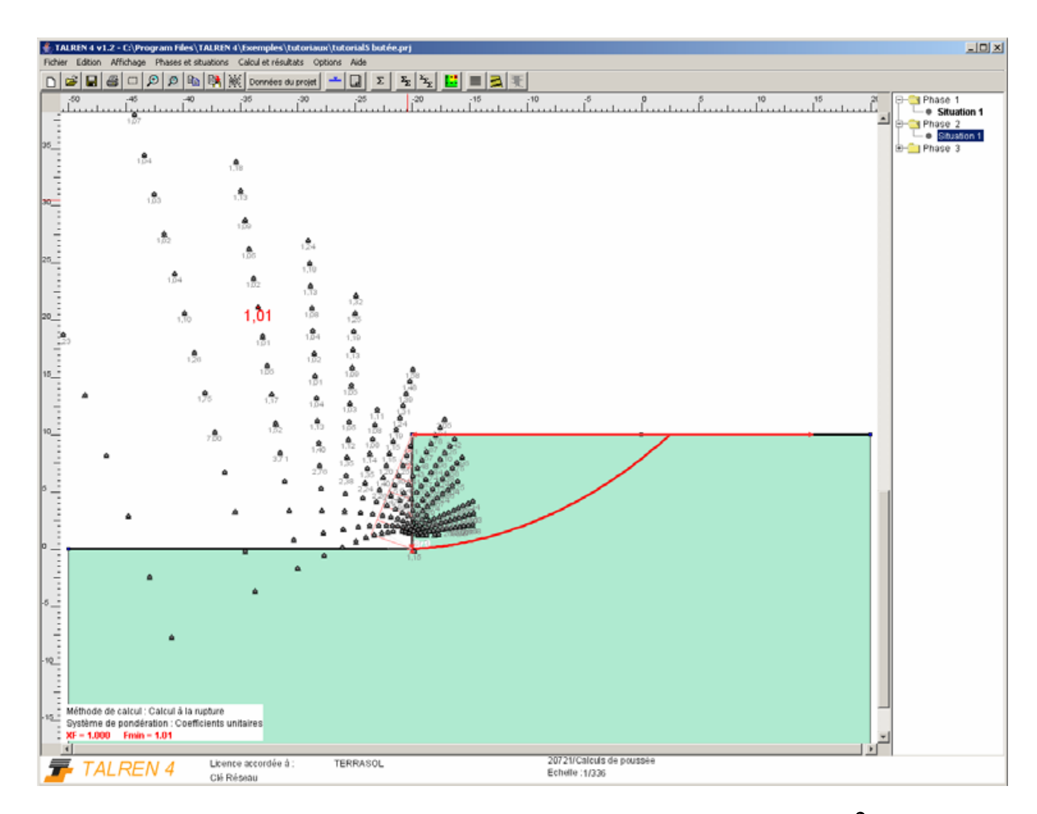


Figure 56 : résultat pour la situation 1 de la phase 2 (butée, $\delta = -\frac{2}{3}\varphi$ *) : F = 1,01*

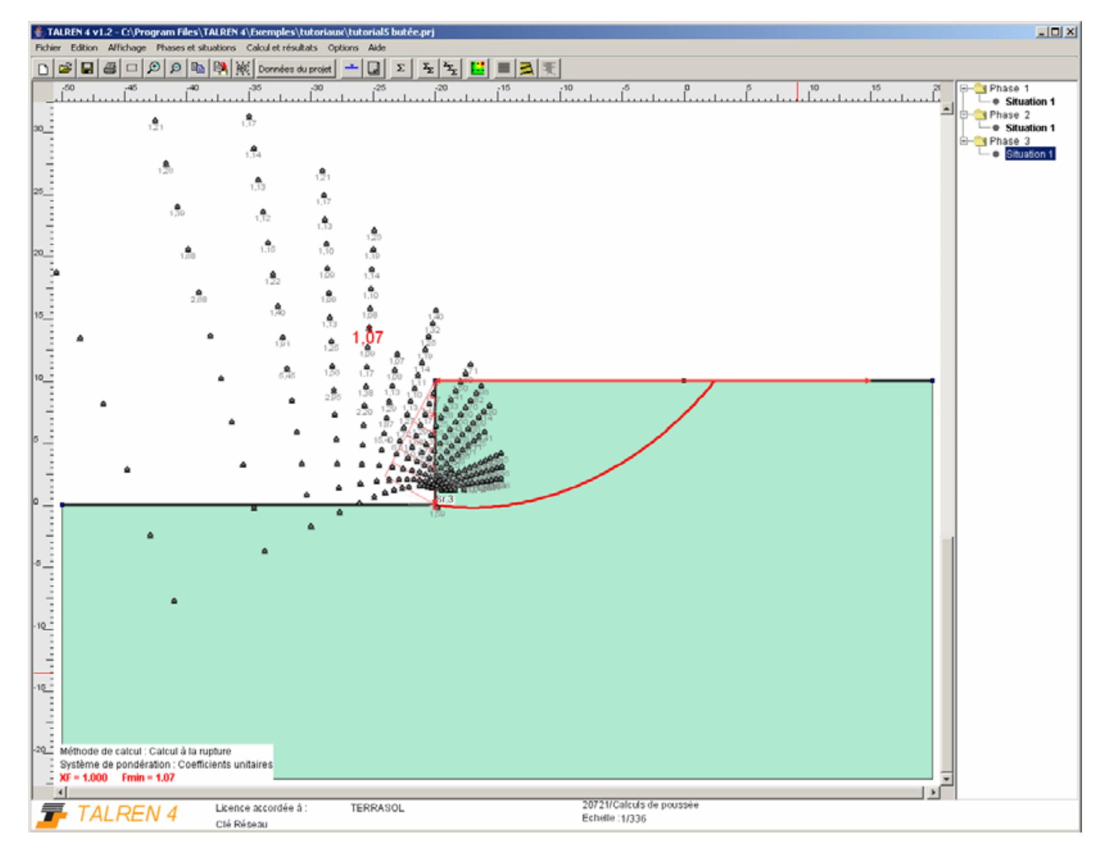


Figure 57 : résultat pour la situation 1 de la phase 3 (butée, $\delta = -\varphi$*) : F = 1,07*

	$K_{p\ théorique}$ (tables)	$K_{p\ calcul\ à\ la\ rupture}$ (Talren)
$\delta = 0$	3,000	3,000
$\delta = -\frac{2}{3}\varphi$	5,300	5,340
$\delta = -\varphi$	6,500	6,950

Tableau 6 : synthèse des valeurs de K_p obtenues avec Talren pour F = 1,0
(après correction si nécessaire de l'intensité des surcharges)
et comparaison aux valeurs des tables de Kérisel et Absi

Dans le cas d'un équilibre de butée, l'évaluation de la charge de rupture par excès (approche par l'extérieur avec le calcul à la rupture) implique une surestimation du coefficient K_p, ce qui est conforme au résultat obtenu : $K_{p\ calcul\ à\ la\ rupture} > K_{p\ théorique}$ pour $\delta = -\frac{2}{3}\varphi$ et $\delta = -\varphi$.

4.3 Tutorial 7 : étude d'un gabion cellulaire par la méthode du calcul à la rupture (spirales à concavité positive ou négative)

4.3.1 Etape 1 : présentation de l'étude

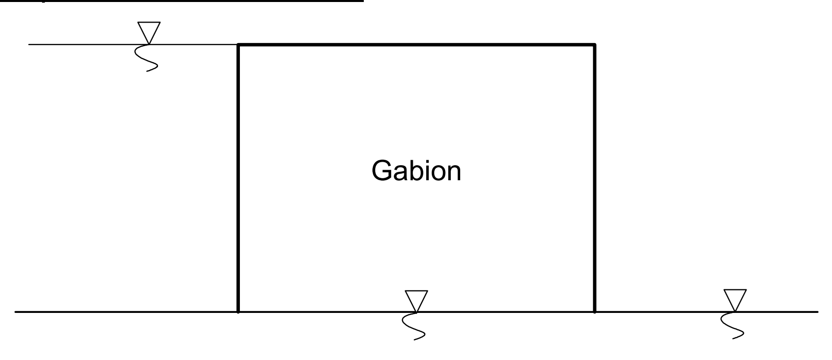


Figure 58 : étude d'un gabion cellulaire – schéma du gabion

Cet exemple traite de la stabilité d'un gabion cellulaire soumis à une poussée d'eau différentielle sur son rideau amont, avec prise en compte des spirales à concavité positive dans un premier temps, puis à concavité négative dans un 2ème temps. Le mécanisme de rupture étudié est celui de la rupture interne au gabion (mécanisme X de Brinch Hansen, 1953).

Nota : dans cet exemple, on ne détaillera pas autant les manipulations que dans le tutorial 1 : pour davantage de détails, vous pouvez vous reporter soit à ce tutorial 1, soit à la partie B du manuel.

- Lancer TALREN en utilisant le menu [Démarrer] de Windows ou en cliquant sur l'icône située sur le bureau Windows ;
- Sélectionner le menu [Fichier] puis l'option [Nouveau] ou cliquer sur l'icône de la barre de boutons.
- Cliquer sur le bouton ou sélectionner le menu [Données] puis [Description générale], et compléter la boîte de dialogue comme indiqué sur la figure suivante : on choisit comme méthode de calcul par défaut du calcul à la rupture, et comme pondérations par défaut le jeu "traditionnel/provisoire" (que l'on complète pour cet exemple par des 1, sans que cela constitue une référence pour d'autres calculs).

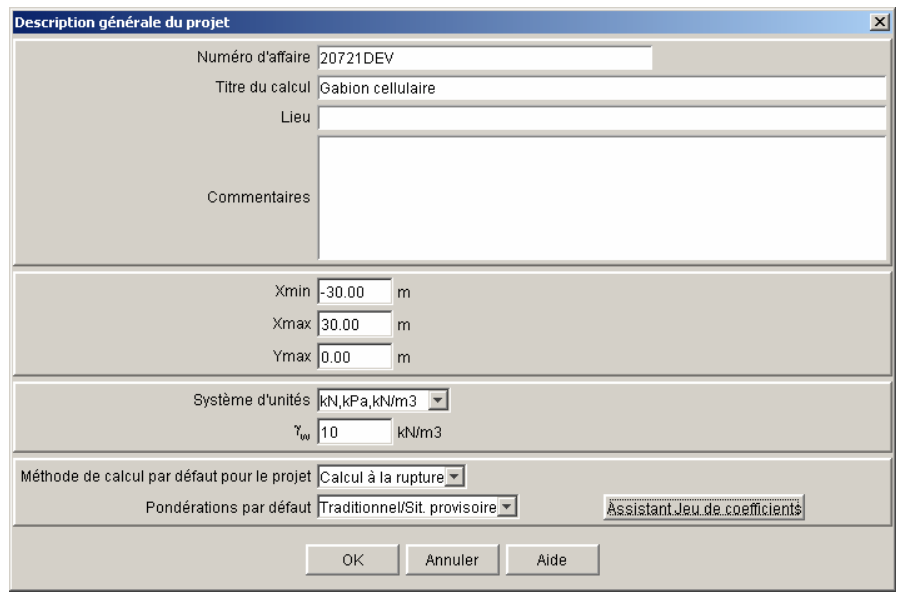


Figure 59 : description générale

4.3.2 Etape 2 : définition de la géométrie

Les limites du modèle et les coordonnées des points de la géométrie sont conformes au tableau et à la figure ci-dessous.

- Pour représenter cette géométrie dans TALREN 4, utiliser l'une des 3 méthodes suivantes : dessin à la souris, saisie des coordonnées directement dans l'écran principal, ou utilisation de la boîte de dialogue de définition de la géométrie.

Figure 60 : géométrie du modèle

4.3.3 Etape 3 : définition des surcharges

Le gabion cellulaire est soumis à une poussée d'eau différentielle sur son rideau amont. On adopte une approche en contraintes effectives où l'effet de l'eau sur le gabion est modélisé par :

- l'application de la poussée différentielle sur le rideau amont (surcharge répartie triangulaire appliquée sur le parement gauche du gabion, conformément aux données de la Figure 61).
- l'utilisation du poids volumique déjaugé $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ dans les couches de sol placées sous nappe (couche de fondation) et du poids total dans le gabion (sol hors nappe). Cf paragraphe 4.3.4.

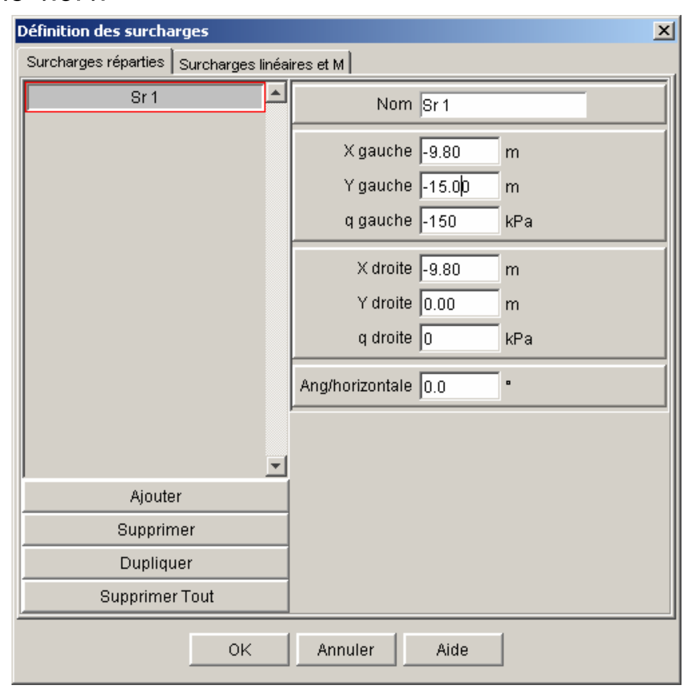


Figure 61 : définition de la surcharge répartie (poussée différentielle sur le gabion)

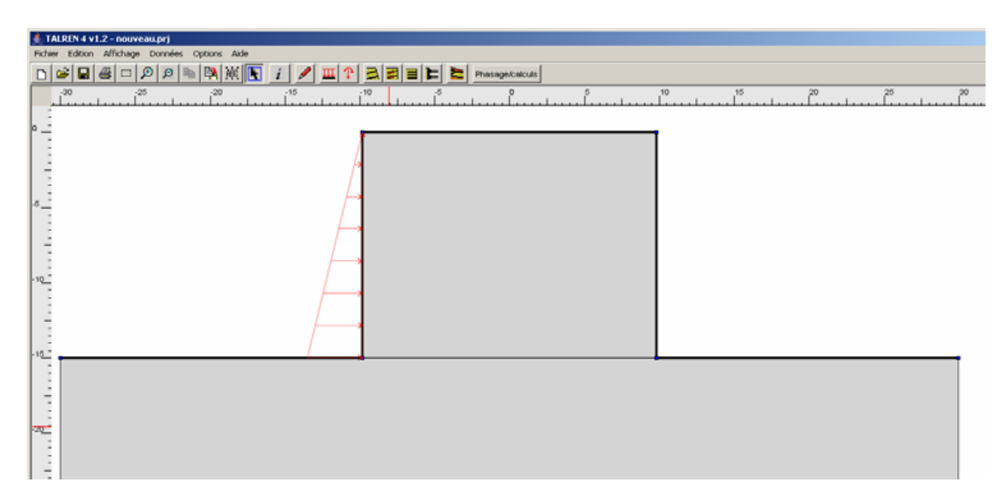


Figure 62 : modèle après définition de la surcharge répartie (poussée différentielle sur le gabion)

4.3.4 Etape 4 : définition des caractéristiques de sol

Deux couches de sol sont à définir. Leurs caractéristiques sont données dans le tableau suivant (poids déjaugé pour la couche 2 sous le gabion).

Couche	γ (kN/m^3)	φ' (°)	c' (kPa)
Couche 1	22.0	30.0	0.0
Couche 2	12.0	30.0	0.0

Tableau 7 : caractéristiques des sols

- Pour définir ces caractéristiques, sélectionner par exemple le menu [Données] puis [Caractéristiques des sols]. Cliquer sur le bouton [Ajouter], puis compléter les données pour la première couche. Cliquer à nouveau sur [Ajouter] puis définir les données pour les autres couches de sol. Pour passer d'une couche de sol à l'autre, cliquer sur le libellé de la couche dans la liste à gauche de la boîte de dialogue. La saisie pour la couche 4 est illustrée sur la figure suivante.

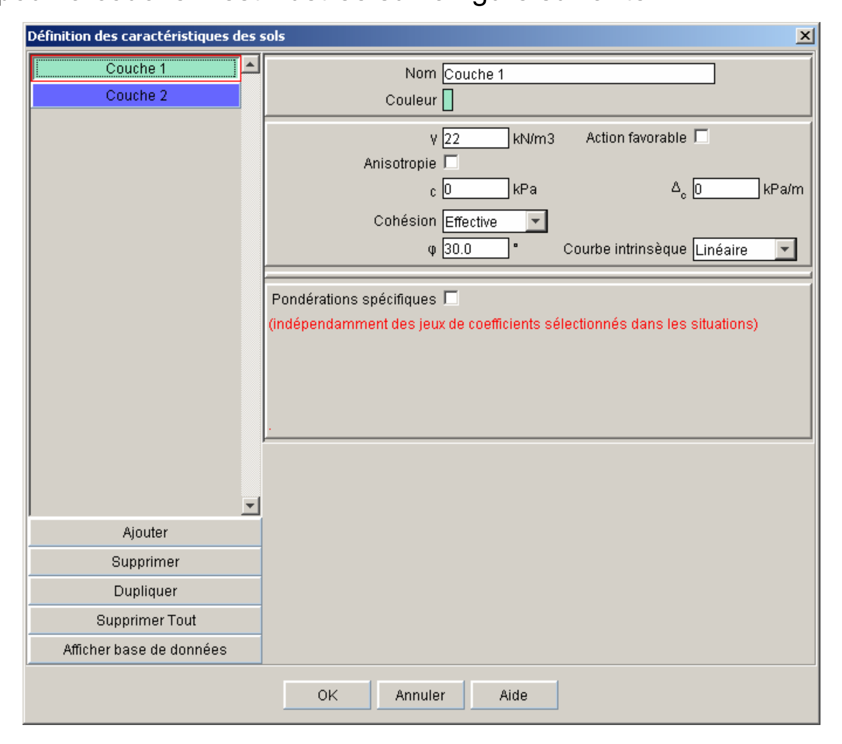


Figure 63 : caractéristiques pour la couche 2

- Pour attribuer ces caractéristiques aux zones de sol, procéder par exemple par drag&drop depuis la liste à gauche de la boîte de dialogue des sols (cf Figure 64 pour la position des couches).

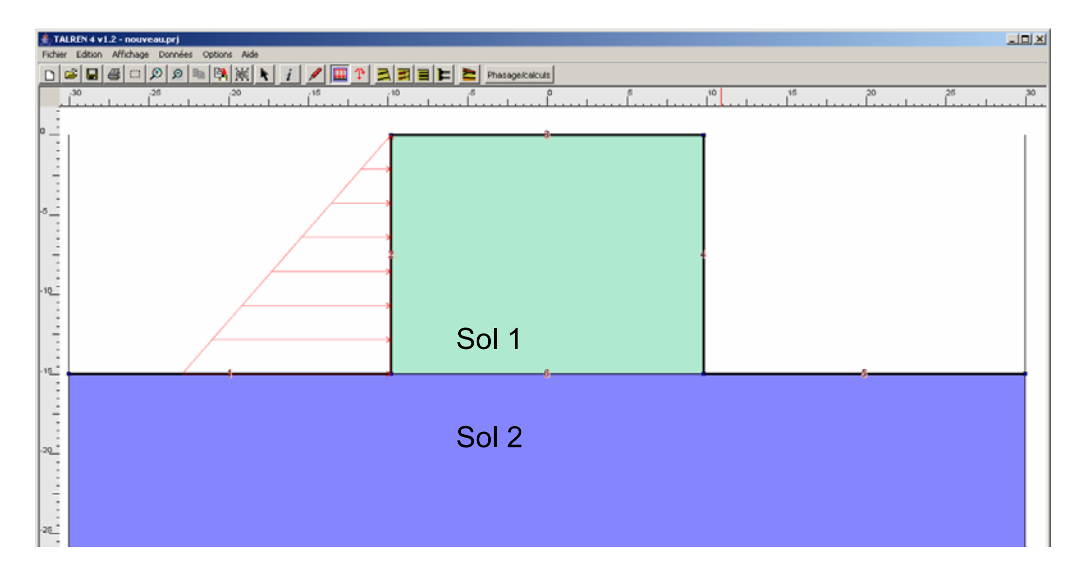


Figure 64 : modèle après définition et attribution des couches de sol

La saisie des données pour ce projet est à présent terminée.

4.3.5 Etape 5 : définition de la phase 1

Une seule phase sera définie pour ce projet (une seule coupe/géométrie).

Passer en mode phasage, grâce au menu [Données] ou au bouton (en enregistrant le projet lorsque le logiciel vous le propose automatiquement). La première phase a été créée automatiquement.

Aucune modification n'est à apporter à la définition de la phase par rapport aux données du projet, sauf l'activation de la surcharge (cliquer une fois sur la surcharge).

4.3.5.1 Définition de la situation 1

La première situation a été créée automatiquement. Il convient néanmoins de définir ses propriétés, et notamment : pondérations partielles et surfaces de rupture.

Nous allons étudier dans cette première situation les spirales à concavité positive (vers le haut).

Pour accéder aux propriétés de la situation, choisir le menu [Phases et Situations], option [Définition de la situation sélectionnée], ou cliquer avec le bouton droit de la souris sur le libellé de la situation, et choisir l'option [Définition de la situation sélectionnée]. Compléter la boîte de dialogue qui apparaît selon les indications suivantes (Figure 65 et Figure 66) :

- Méthode de calcul : calcul à la rupture (option choisie par défaut dans la description générale)
- Pondérations partielles : "Traditionnel/provisoire" (option choisie par défaut dans la description générale). On conserve la valeur par défaut pour XF (XF = 1,0).
- Sismique : nous n'allons pas définir de conditions sismiques pour cette situation.
- Définition des surfaces de rupture : nous allons définir des spirales logarithmiques ayant pour extrémités les 2 bases du gabion (cf Figure 67), avec pour cette première situation une concavité orientée vers le haut, et un balayage de l'angle au centre par pas de 10°.

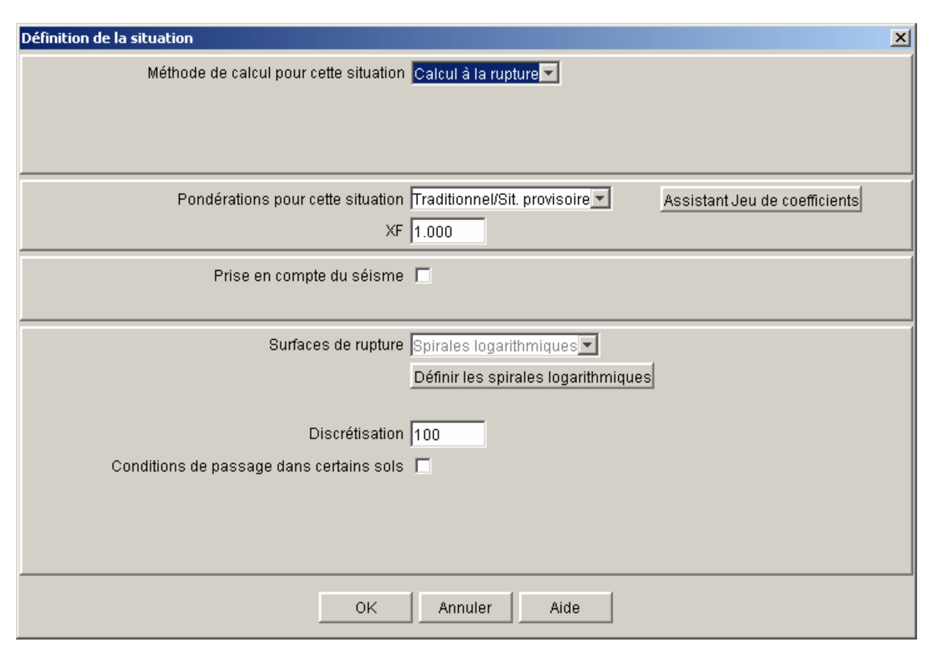


Figure 65 : définition de la 1ère situation de la 1ère phase

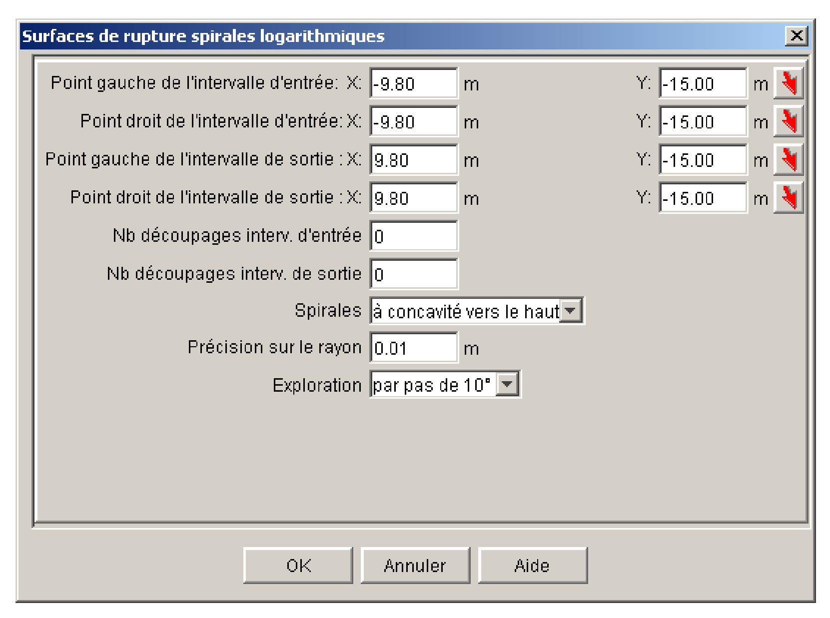


Figure 66 : définition des spirales logarithmiques pour la 1ère situation de la 1ère phase (concavité des spirales orientée vers le haut)

Calcul et résultats pour la situation 1

- Pour effectuer le calcul de cette situation, choisir le menu [Calculs] puis l'option [Calculer la situation courante] ou cliquer sur le bouton Σ de la barre de boutons. Le calcul s'effectue puis le résultat s'affiche. Sur la Figure 67, l'affichage de toutes les surfaces de rupture calculées a été demandé.

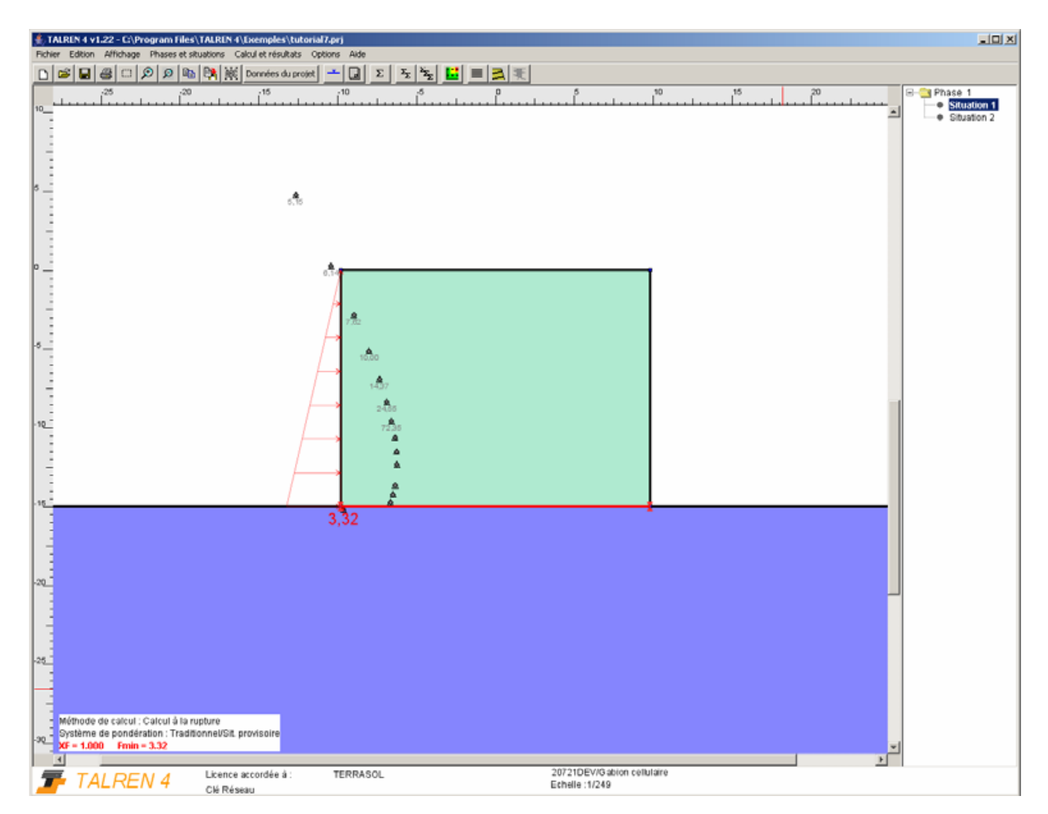


Figure 67 : résultat pour la situation 1 de la phase 1 : concavité positive

Le coefficient de rupture (ou facteur de confiance) obtenu est F = 3,32.

La spirale la plus critique est celle de concavité nulle (droite reliant les 2 extrémités).

Il convient donc d'explorer également les spirales à concavité négative, pour vérifier si elles ne conduisent pas à un résultat plus défavorable.

Pour cela, nous allons définir une seconde situation dans la même phase.

4.3.5.2 Définition de la situation 2

Plutôt que de redéfinir les paramètres pour cette situation, nous allons réutiliser les paramètres définis pour la situation 1, puis modifier uniquement la définition des spirales.

- Cliquer sur la situation 1.
- Cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Dupliquer la situation sélectionnée].
- Autre option possible : cliquer avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Copier la situation] du menu contextuel, puis cliquer à nouveau avec le bouton droit de la souris et sélectionner l'option [Coller la situation].
- Il reste ensuite à modifier les propriétés de la situation, en modifiant la concavité des spirales, conformément à la Figure 68 : concavité vers le bas cette fois.

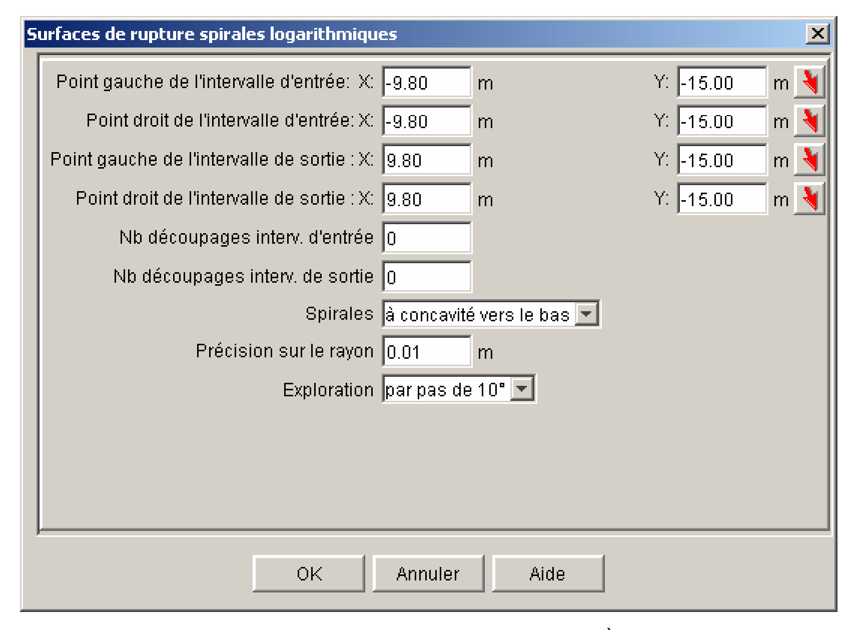


Figure 68 : définition de la surface de rupture pour la 2ème situation de la 1ère phase (concavité des spirales orientée vers le bas)

Calcul et résultats pour la situation 2

- Il ne reste plus qu'à calculer la situation 2. Le résultat obtenu est indiqué sur la Figure 69 (avec affichage de toutes les surfaces de rupture calculées).

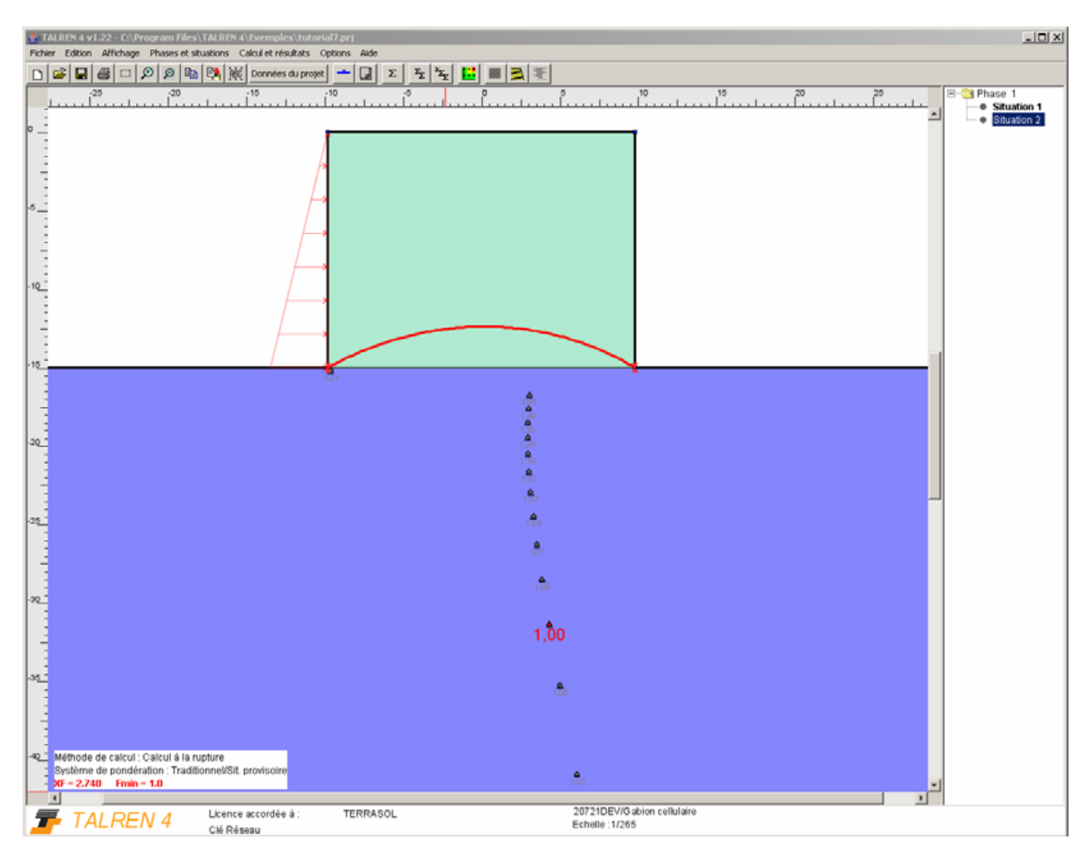


Figure 69 : résultat pour la situation 2 de la phase 1 : concavité négative

Cette fois, on a obtenu F = 2,69.

Il convient de rechercher la valeur de XF permettant d'obtenir F = 1 : XF = 2,74.

Ce résultat montre que le calcul pour les concavités négatives est plus défavorable que celui de la situation 1 pour les concavités positives. La spirale la plus défavorable est la spirale de concavité négative avec un angle au centre $\theta = 60°$.

Cette deuxième situation a mis en évidence un mécanisme de rupture interne au gabion qu'il faut prendre en compte, ce qui illustre l'intérêt dans ce cas du calcul à la rupture.

Nota : il pourrait sembler plus logique de modéliser l'action de l'eau par une nappe extérieure, plutôt que par une surcharge horizontale équivalente.

Mais le calcul avec nappe extérieure n'aurait pas donné le résultat souhaité dans ce cas : en effet, dans l'application de la méthode du calcul à la rupture faite dans Talren, il a été choisi de ne pas séparer les actions du poids et de l'eau. On examine donc si le cumul (poids + eau) est moteur ou résistant. Il n'est ainsi pas possible de dissocier les actions du poids et de l'eau, ce qui serait nécessaire ici (le poids étant résistant et l'action de l'eau motrice).

4.4 Nouveau tableau récapitulatif complet des exemples fournis avec Talren 4

Les fichiers correspondant aux exemples présentés dans le tableau de la page suivante sont fournis au format tal et au format prj (modèles équivalents) dans le répertoire d'installation de Talren 4.

Tableau 8 : Synthèse des exemples traités dans la partie D du manuel

NOMS DES EXEMPLES	Tutorial 1	Tutorial 2	Tutorial 3	Vidange talus	Tutorial 4	Tutorial 6	Tutorial 7	Mur autoroute	Exemple 1	Exemple 2	Exemple 3	Exemple 4	Exemple 5	Exemple 6	Exemple 7	Exemple 8	Exemple 9	Exemple 10	Exemple 11	Exemple 12	Exemple 13	Exemple 14	Exemple 15	Exemple 16	Exemple 17	Exemple 18	Exemple 19	Exemple 20	Exemple 21	Exemple 22	Exemple 23
MODE DONNEES																															
TYPE DE FICHIER																															
TALREN 4 (.prj)	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TALREN 97 (.tal)		x			x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PLAXIS v8 (.plx)				x																											
SURCHARGES																															
SURCHARGES SURFACIQUES	1	1				3	1		3	1	3		1	1	1	2		5		3		3	1	3		1		4	1	1	
SURCHARGES LINEAIRES / MOMENTS ADDITIONNELS																				2											
RENFORCEMENTS																															
CLOUS	4							7					4	11									4				3				
TIRANTS (scellement en tout ou rien)									1			4	1	3								1									
TIRANTS (scellement ou prorata de la longueur utile)								5																				5			
BANDE DE RENFORCEMENTS																				4											
BUTONS																		5													
GEOTEXTILES											15				1																
PIEUX OU MICROPIEUX		2			3				2					1											3	5				2	
CISAILLEMENT VARIABLE EN PROFONDEUR		x																												x	
COUCHES DE SOL																															
NOMBRE DE COUCHES DE SOL	2	3	2	2	4	1	2	3	2	4	6	5	3	7	3	3	3	3	4	5	3	3	2	4	4	5	2	7	3	3	2
SUBSTRATUM															x				x												
COHESION VARIABLE EN PROFONDEUR		x																											x	x	
ANISOTROPIE DE COHESION																x															
COURBE INTRINSEQUE NON LINEAIRE																	x														
MODE PHASAGE/CALCULS																															
PHASES																															
NOMBRE DE PHASES	4	2	3	3	2	3	1	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NOMBRE MAX DE SITUATIONS/PHASE	4	2	2	1	4	1	2	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
HYDRAULIQUE																															
NAPPE PHREATIQUE		x(*)			x			x		x		x		x(*)					x	x				x	x	x(*)		x	x(*)	x(*)	
FOND DE NAPPE																			x												
U LONG D'UNE SURFACE DE RUPT. NON CIRC.																					x										
MAILLAGE DE PRESSIONS INTERSTITIELLES			x	x																		x									
COEFFICIENT RU																															x
NAPPES EXTERIEURES														x					x	x				x							
METHODE DE CALCUL																															
FELLENIUS																															
BISHOP	x	x			x				x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		x	x	x		x	x			x	x
PERTURBATIONS			x	x				x										x	x		x				x			x	x		
CALCUL A LA RUPTURE	x	x	x			x	x																								
SURFACES DE RUPTURE CIRCULAIRES																															
MODE AUTOMATIQUE / POINT DE PASSAGE IMPOSE	x		x	x				x																							
MODE AUTOMATIQUE / 1er CERCLE TANGENT A UNE COUCHE DE SOL								x																							
MODE MANUEL / POINT DE PASSAGE IMPOSE	x									x	x		x			x		x		x		x	x	x			x	x			x
MODE MANUEL / 1er CERCLE TANGENT A UNE COUCHE DE SOL		x							x					x	x		x		x							x			x	x	
MODE MANUEL / 1er CERCLE RECOUPANT LE TALUS																															
CONDITIONS DE PASSAGE DANS CERTAINS SOLS													x											x						x	
SURFACES DE RUPTURE QUELCONQUES (POLYGONALES)																															
SURFACES DE RUPTURE QUELCONQUES (POLYGONALES)					x							x									x				x						
SURFACES DE RUPTURE SPIRALES LOGARITHMIQUES																															
SPIRALES LOGARITHMIQUES	x	x	x			x	x																								
SIMULATION D'UN SEISME																															
SISMIQUE								x															x								

(*) : dans le tal, un seul point pour la nappe suffisait à définir une nappe horizontale : ce n'est plus vrai dans Talren 4 : il faut définir au moins 2 points